

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

EFEKTIVNÍ PROVOZ MODERNÍCH JEDNOTEK EVO

EFFECTIVE OPERATION OF UP-TO-DATE WASTE-TO-ENERGY UNITS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TEREZA CAFOURKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL TOUŠ

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tereza Cafourková

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

editel ústavu Vám v souladu se zákonem 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Efektivní provoz moderních jednotek EVO

v anglickém jazyce:

Effective operation of up-to-date waste-to-energy units

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Seznámit se s aktuální problematikou energetického využití odpadů. Zpracovat analýzu reálných dat z provozu moderní spalovny komunálních odpadů pro následné matematické modelování. Jedná se o podmínky nezbytné pro následný návrh výrobového systému pro efektivní plánování výroby energií v jednotkách pro termické zpracování komunálních odpadů s maximální ekonomickým efektem pro provozovatele.

Cíle diplomové práce:

Určit vzájemné závislosti mezi sledovanými parametry (zpracovaný odpad, vyrobená pára, exportovaná energie atd.). Vytvořit jednoduchý bilanční model technologie a výsledky úvodní analýzy využít jako vstupní hodnoty pro matematické modelování. Zhodnotit ekonomický a environmentální přínos provozu jednotek pro energetické využívání odpadů.

Seznam odborné literatury:

[1]Ch. Ludwig, S. Hellweg, S. Stucki. Municipal Solid Waste Management, Springer-Werlag, Germany, 2003

[2]Reimann D. O.: CEWEP Energy Report (Status 2001-2004). Result of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and Coefficients, Plant Efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Energy Results, Bamberg, Germany, Updated July 2006

[3]Bébar L., Pavlas M., Pařízek T., Urban L., Stehlík P., Podmínky efektivního energetického využívání odpadů, 54. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2007, 15.-18. října 2007, Srní, Šumava

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Touš

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
editel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Návrh výpočtového systému pro efektivní plánování výroby energií je hlavní náplní této diplomové práce.

Úvodní část se věnuje popisu moderních jednotek termického využívání odpadů (EVO), konkrétně je zaměřený na spalovnu komunálních odpadů v Liberci, Termizo, a.s.

V hlavní části je provedena analýza dat z provozního deníku zmíněného zařízení, jejíž výsledky slouží jako vstupní hodnoty matematického modelování. Jedná se o činnosti nezbytné pro návrh výpočtového systému. Výsledná optimalizace plánu dávkování odpadu s maximálním ekonomickým efektem pro provozovatele je hlavním výstupem této práce.

Závěr je věnován zhodnocení ekonomického a enviromentálního přínosu provozu jednotek TVO a nabízí další možné rozšíření optimalizace.

Klíčová slova

Zpracování odpadů, energetické využití odpadů, výhřevnost paliva, dostupnost odpadů, analýza rozptylu, výroba páry, tepelná a elektrická energie, matematický model, optimalizace, výpočtový systém.

Abstract

The main content of this thesis is a suggestion of computing system for efficient energy manufacture.

The introduction devotes to description of up-to-date waste-to-energy units (EVO), it concentrates on Incinerator of municipal wastes of TERMIZO a.s., specifically.

In the main body of this work is the data analysis of factory journal that has been implemented, results have been used as mathematical model output value. These activities are necessary for computing system suggestion. Resulting optimization of batch wasting plan with maximum economic effect for entrepreneur is the main output of this work.

Conclusion consists of environmental and economic evaluation of operation of up-to-date waste-to-energy units and offers another optimization possibility.

Keywords

Waste processing, waste to energy, fuel efficiency, availability of waste, analysis of variance, steam generation, thermal and electric energy, mathematical model, optimization, computing system.

Bibliografická citace

CAFOURKOVÁ, T. *Efektivní provoz moderních jednotek EVO*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Touš.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci na téma **Efektivní provoz moderních jednotek EVO** vypracovala samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Brně dne. 5. 2009

.....
podpis

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Michalu Toušovi za množství cenných rad, pečlivý a ochotný přístup a odborné vedení při tvorbě této diplomové práce. Poděkování patří také Doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc. za zájem a spolupráci při jednání se společností Termizo, a.s.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	5
Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam příloh	9
1 Úvod	10
2 Spalovna komunálních odpadů TERMIZO a.s.	12
2.1 Popis technologie	13
2.1.1 Protitlaká parní turbína	15
2.1.2 Parní kondenzační turbína	21
2.2 Čistění spalin	21
2.2.1 Mokrý vypírka spalin s VENTURI pračkou	24
2.3 Úprava odpadních vod	24
3 Materiálová a energetická bilance systému	26
3.1 Vstupní proudy	30
3.2 Výstupní proudy	30
4 Analýza dat z provozního deníku	33
4.1 Výkon spalovny	33
4.2 Dostupnost odpadu	35
4.2.1 Analýza rozptylu	36
4.2.2 Rozbor dat	38
4.3 Výhřevnost odpadu	40
4.3.1 Rozbor dat	42
4.4 Regresní analýza	45
5 Matematický model pro vyčíslení příjmů jednotky EVO	50
6 Optimalizace provozu	54
6.1 Výsledky optimalizace	54
6.2 Zhodnocení výsledků optimalizace	59
7 Závěr	60
Seznam použité literatury	61
Přílohy	63

Seznam použitých symbolů a zkratk

Označení	Jednotka	Význam
E_f	GJ/t	teplo dodané přídatným palivem
E_T	MWh	roční nebo měsíční výroba svorkové elektřiny ze soustrojí nebo výroby s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla
E_w	GJ/t	energie uvolněná spalováním odpadu
H_0	-	nulová hypotéza
H_1	-	alternativní hypotéza
i	-	interval LHV
i_{ef}	kJ/kg	efektivní entalpie páry i_{ef}
i_{p1}	kJ/kg	měrná entalpie přehřáté páry na vstupu do turbíny
i_{p2}	kJ/kg	měrná entalpie na výstupu z turbíny
$i_{p2\ skut}$	kJ/kg	skutečná měrná entalpie předaná vodě spaliny
I_{circ}	GJ/t	energie cirkulovaná (elektrická i tepelná), která je nutná pro proces (energie pro elektromotory, ohřev spalovacího vzduchu, ohřev napájecí vody apod.)
I_{imp}	GJ/t	importovaná energie ve formě paliva nepodílející se na výrobě elektrické energie
Δi_{efekt}	kJ/kg	skutečná měrná entalpie
Δi_{teoret}	kJ/kg	teoretická měrná entalpie
$i_{st\ hp\ net}$	GJ/t	rozdíl entalpie páry a napájecí vody
j	-	den
LHV	GJ/t	výhřevnost odpadu
$m_{i,j}$	t/h	množství dávkovaného odpadu ve dni j s výhřevností z intervalu i
$m_{celk\ i}$	t/h	dostupné množství odpadu s výhřevností intervalu i v daném období
$m_{st,w}$	t/rok	množství vyrobené páry z odpadu bez podílu páry vyrobené z importované energie E_f
m_w	t/rok	množství zpracovaného odpadu
P_{el}	kW _{el}	elektrický výkon turbíny
P_t	kW	tepelný výkon turbíny
PI_{ef}	-	Plant Efficiency Factor (ukazatel efektivnosti výroby energie)
p_{p1}	MPa	tlak přehřáté páry na vstupu do turbíny
p_{p2}	MPa	tlak páry po expanzi
Q_{el}	GJ	tepelná energie v páře, spotřebovaná k výrobě elektřiny v parních turbosoustrojích
Q_{pal}	GJ	energie paliva spotřebovaného v kotlích ke krytí výroby elektřiny a tepla

Q_{pal}^E	GJ	energie paliva spotřebovaného v kotlích připadajícího na výrobu elektřiny
Q_{pal}^T	MWh	celkový energetický potenciál paliva použitého ke společné výrobě užitečného tepla a elektřiny
$Q_{už}^T$	MWh	roční nebo měsíční výroba užitečného tepla dodaného ze soustrojí nebo výroby s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla, které je využíváno ke sdílení a předání tepla bez následné transformace
Q_{prod}	GJ/t	celková výše vyrobené energie, tepelné i elektrické energie
s_{p1}	kJ/kg.°C	měrná entropie na vstupu do turbíny
s_{p2}	kJ/kg.°C	měrná entropie na výstupu z turbíny
s_{max}	t/h	maximální množství vyrobené páry do překročení kapacity kotle
t_{vt}	h	dobu, po kterou je uplatňován vysoký tarif
T_{p1}	°C	teplota přehřáté páry do turbíny
T_{p2}	°C	teplota páry po expanzi
T_b	°C	teplota spalin na výstupu z kotle
UPE	%	úspor primární energie
Y_i		naměřené hodnoty
\hat{Y}_i		funkční hodnoty
z_d	Kč/MWh	dotace za kogenerační výrobu
z_e	Kč/GWh	zisk z prodeje GWh elektřiny
z_o	Kč/t	příjem za tunu spáleného odpadu
z_p	Kč/t	zisk z prodeje tuny páry
η_e	-	Energy utilization rate (ukazatele efektivity využití energie)
η_{el}	-	účinnosti výroby elektřiny v parním turbosoustrojí
η_{el}^{CHP}	-	účinnost kogenerační výroby elektřiny
η_t^{CHP}	-	účinnost kogenerační výroby tepla
η_{celk}^{CHP}	-	celková termická účinnost kogenerace
η_e^T	-	elektrická účinnost kombinované výroby definována jako roční nebo měsíční výroba elektřiny dělená spotřebou paliva použitého v soustrojí nebo výrobě s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla
η_q^T	-	energetická účinnost dodávky tepla z kombinované výroby definována jako roční nebo měsíční výroba užitečného tepla v soustrojí nebo výroby s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla dělená spotřebou paliva použitého v tomto soustrojí nebo výrobě
η_{gen}	-	účinnost generátoru
η_r^V	-	referenční hodnota energické účinnosti oddělené výroby tepla
η_r^E	-	referenční hodnota účinnosti oddělené výroby elektřiny
η_t	-	tepelná účinnost parní turbíny

Zkratka	Význam
ANOVA	Analysis of variance (analýza rozptylu)
BAT	the Best Available Technology (nejlepší dostupná technologie)
EVO	zařízení na energetické využití odpadů
TKO	tuhý komunální odpad
TVO	termické využití odpadů
PCDD/F	polychlorovaných dibenzo-dioxinů/ furanů
POP	Persistent Organic Pollutants (perzistentní organické látky)
SPRUK	směs popelovin pro rekultivaci a úpravu krajiny

Seznam obrázků

Obr. 1	Pohled na spalovnu Termizo, a.s. v Liberci [2]	12
Obr. 2	Základní technologické schéma zařízení na energetické využití odpadů [2].....	13
Obr. 3	Blokové schéma spalovny Termizo a.s. [2]	14
Obr. 4	Protitlaké parní turbosoustrojí [5]	16
Obr. 5	Schéma zapojení parní turbíny []	17
Obr. 6	Expanze páry v turbíně (i-s diagram) [5]	18
Obr. 7	Kondenzační parní turbosoustrojí [5]	21
Obr. 8	Dioxinový filtr po montáži [2]	22
Obr. 9	Princip metody likvidace emisí látek typu PCDD/F [2]	23
Obr. 10	Uspořádání mokré vypírky spalín s Ventura pračkou [4]	25
Obr. 11	Sedimentační nádrž ve spalovně Termizo, a.s. [2]	25
Obr. 12	Schematické znázornění hlavních energetických toků na spalovně odpadů.....	26
Obr. 13	Složení produkovaného odpadu v roce 2004 []	31
Obr. 14	Složení produkovaného odpadu []	31
Obr. 15	Průměrné množství dostupného odpadu v závislosti na měsíci v roce	36
Obr. 16	Normální pravděpodobnostní grafy množství spáleného odpadu [t]	39
Obr. 17	Krabicový graf množství spáleného odpadu [t]	39
Obr. 18	Trend vývoje průměrné výhřevnosti směsného komunálního odpadu	42
Obr. 19	Průměrné měsíční výhřevnosti spalovaného odpadu pro průměrný měsíc.....	42
Obr. 20	Normální pravděpodobnostní grafy výhřevnosti spáleného odpadu.....	43
Obr. 21	Krabicový graf výhřevnosti spáleného odpadu.....	44
Obr. 22	Množství dostupného odpadu v závislosti na výhřevnosti pro průměrný měsíc	45
Obr. 23	Závislost vyrobené páry [t/h] na množství spáleného odpadu [t/h]	47
Obr. 24	Množství vyrobené páry v kotli na množství spáleného odpadu – průměrné.....	47
Obr. 25	Závislost exportované páry [t/h] na vyrobené páře [t/h].....	48
Obr. 26	Závislost exportované elektřiny [MW] na vyrobené páře [t/h].....	49
Obr. 27	Optimalizační plán s maximálním finančním efektem pro měsíc LEDEN	56
Obr. 28	Optimalizační plán s minimálním finančním efektem pro měsíc LEDEN	56
Obr. 29	Optimalizační plán s maximálním finančním efektem pro měsíc BŘEZEN	57
Obr. 30	Optimalizační plán s minimálním finančním efektem pro měsíc BŘEZEN.....	57
Obr. 31	Optimalizační plán s maximálním finančním efektem pro měsíc ČERVENEC	58
Obr. 32	Optimalizační plán s minimálním finančním efektem pro měsíc ČERVENEC	58

Seznam tabulek

Tab. 1	Základní údaje zařízení [2]	15
Tab. 2	Vstupní parametry	16
Tab. 3	Výstupní parametry	17
Tab. 4	Parametry páry na turbíně	20
Tab. 5	Odstranění znečišťujících látek [4]	24
Tab. 6	Podmínky pro kategorizaci způsobu termického zpracování odpadu	28
Tab. 7	Vyhodnocení ukazatelů efektivity výroby a využití energie za období 01/2007 až 09/2007	29
Tab. 8	Charakteristické zastoupení složek komunálního odpadu, včetně výhřevností složek [8]	30
Tab. 9	Výkonové a spotřební charakteristiky provozu spalovny TERMIZO	34
Tab. 10	Průměrné množství dostupného odpadu	35
Tab. 11	Průměrné výhřevnosti odpadu v jednotlivých měsících a letech	41
Tab. 12	Hodnoty hledaných parametrů funkcí	48
Tab. 13	Údaje potřebné pro výpočet účelové funkce	53

Seznam příloh

Příloha 1	Základní parametry parní kondenzační turbíny	63
-----------	--	----

1 Úvod

Termické zpracování odpadů patří mezi velmi účinné metody likvidace odpadů, které umožňují recyklaci energie. Při termických procesech je odpad vystaven vysokým teplotám za řízených podmínek. Dochází přitom k jeho rozkladu, který lze provádět **oxidací** (spalování za přebytku kyslíku) nebo **redukci** (nedokonalé spalování při nedostatku kyslíku).

Technologie založené na redukčních procesech (zplyňování nebo pyrolýza – *pyrolýzní spalovna*) byly vyvinuty jako alternativa k tradičnímu spalování za nadstechiometrického přívodu spalovacího vzduchu (*oxidační spalovna*).

Zásadní výhodou tohoto postupu je, že k rozkladu dochází při nedostatku kyslíku a tím je omezena tvorba polychlorovaných dibenzo-dioxinů resp. furanů.

Nedostatkem je však obtížné řízení procesu nedokonalého spalování produktů pyrolýzy, kdy především s ohledem na nerovnoměrnou skladbu odpadů, dochází k explozím a k emisím toxických plynů v případě vzestupu tlaku ve spalovacím prostoru.

Praktické uvedení těchto koncepcí do trvalého provozu při spalování tuhých komunálních odpadů proto nebylo úspěšné.

Přímé spalování odpadů v oxidačních spalovnách je prováděno za dostatečného přístupu vzduchu (spalování přídatného paliva, nejčastěji zemního plynu, s daným přebytkem vzduchu při spalování kapalného odpadu a regulovaný přívod sekundárního vzduchu uvnitř rotační pece pro pevný odpad). K uvolnění veškerého tepla obsaženého v odpadu dochází již v prvním stupni. Tepelný rozklad všech sloučenin (především chloru a fluoru) je dokončen v sekundární komoře při zvýšené teplotě.

Tyto podmínky ale způsobují zvýšení koncentrace oxidů dusíku ve spalinách a zvýšená teplota znesnadňuje rychlé ochlazení produktů na teplotu, kdy nedochází k nové tvorbě již zmíněných polychlorovaných dibenzo-dioxinů resp. furanů. Vzniklé spaliny je proto nutno vždy čistit a samotné čištění spalin je nákladnější než realizace spalovacího procesu.

Společnou předností obou postupů je minimalizace objemu určeného pro další uložení a možnost využití energie obsažené v odpadu. Problémem však zůstává sezónní závislost na produkci především komunálních odpadů. I proto, ačkoli se termickým zpracováním odstraňují (částečně či úplně) nežádoucí fyzikální a nebezpečné vlastnosti odpadů, je skládkování odpadu v naší republice stále nejrozšířenější.

Výhody skládkování jsou po ekonomické stránce v menší investiční i provozní náročnosti. Je ale snahou tento způsob omezovat už z důvodů tvorby metanu, což je plyn s mnohem větším klimatickým vlivem než oxid uhličitý vznikající při spalování. A jelikož jedním z nejvíce diskutovaných problémů současné doby je skleníkový efekt podílející se na postupném oteplování planety, je nutné maximálně redukovat emise skleníkových plynů.

K tomuto se Česká Republika zavázala společně s celou řadou zemí v rámci Kjótského protokolu¹ (ČR v rámci Kjótského protokolu k Rámcové úmluvě OSN o klimatických

změnách podepsala kvantifikovaný závazek na snížení emisí v letech 2008 až 2012 o 8%).

¹ **Kjótský protokol** je protokol k Rámcové úmluvě OSN o klimatických změnách. Průmyslové země se v něm zavázaly snížit emise skleníkových plynů o 5,2 %. Kromě oxidu uhličitého (CO₂), methanu (CH₄) a oxidu dusného (N₂O), se závazek týká hydrogenovaných fluorovodíků (HFCs), polyfluorovodíků (PFCs) a fluoridu sírového (SF₆).[1]

Kjótský protokol získal svůj název podle japonského města Kjóto, ve kterém byl v prosinci 1997 dojednán [1].

Procesní inženýrství se z energetických a enviromentálních problémů zabývá zejména:

- snižováním energetické náročnosti procesů,
- zvyšováním účinnosti využití energie obsažené ve fosilních palivech,
- využitím obnovitelných a alternativních zdrojů energie.

Své místo zde má, jak je zřejmé, i energetické využití komunálního odpadu, tzn. i technologie spaloven komunálního odpadu.

Je tedy snahou dosáhnout co nejefektivnějšího provozu těchto jednotek. Díky zvýšení účinnosti moderních energetických zdrojů se pro výrobu stejného množství energie spotřebuje méně paliva a současně se do atmosféry uvolní i méně skleníkových plynů a dalších škodlivin. Významným nástrojem je zde **kogenerace**, čili společná výroba tepelné a elektrické energie.

Energie uvolněná spalováním paliva se využije k produkci elektrické energie a následně tepla. Při takto kombinované výrobě lze dosáhnout celkové účinnosti až 90%. Množství takto uspořené tepla pak přímo odpovídá množství nevyprodukovaných emisí. V globálním měřítku tak kogenerace přispívá k redukci emisí skleníkového plynu oxidu uhličitého.

Příkladem vysoce účinného kogeneračního zdroje je Liberecká spalovna komunálních odpadů TERMIZO a.s. (*obr. 1*), jedna ze tří velkých spaloven (Praha, Brno), která od roku 1999 řeší problematiku termického využití tuhého komunálního odpadu (TKO) a některých dalších vybraných druhů odpadů pro výrobu tepla, teplé vody a elektřiny.

Toto moderní zařízení na energetické využití odpadů (EVO) je nezanedbatelným technologickým subjektem ve vztahu k životnímu prostředí. Při dodržování příslušných norem se neustále snaží o zkvalitňování veškerých procesů a implementaci nejnovějších vědeckých poznatků šetrně přistupuje k likvidaci odpadů. Mezi přední zájmy společnosti se tak řadí výzkum a vývoj nových metod čištění a využívání spalin [2].

V této práci bude řešena problematika maximálního využití energetického potenciálu odpadů v podobě návrhu výpočtového systému pro efektivní plánování výroby energií. Budou k tomu použita skutečná data z provozního deníku (z let 2002 - 2006), která společnost Termizo a.s. poskytla.

Nejdříve bude provedena analýza dat z provozního deníku, na jejíž základě se stanoví případné závislosti (statistický software MINITAB) potřebné pro následný návrh plánu dávkování odpadu s maximálním ekonomickým efektem pro provozovatele

Výsledná optimalizace (simulační bilančně-ekonomické výpočty) bude řešena s pomocí softwaru MapleSoft Maple a GAMS.



Obr. 1 Pohled na spalovnu Termizo, a.s. v Liberci [2]

2 Spalovna komunálních odpadů TERMIZO a.s.

Toto zařízení, které je postaveno přímo v areálu Teplárny Liberec, je spojeno s energickým uzlem teplárny, což umožňuje využití synergického efektu při odběru pomocných energií a provozních prostředků (napájecí voda, zemní plyn), jakož to i při dodávkách vyrobené energie do soustavy teplárny [2].

Efekty moderní spalovny [2]:

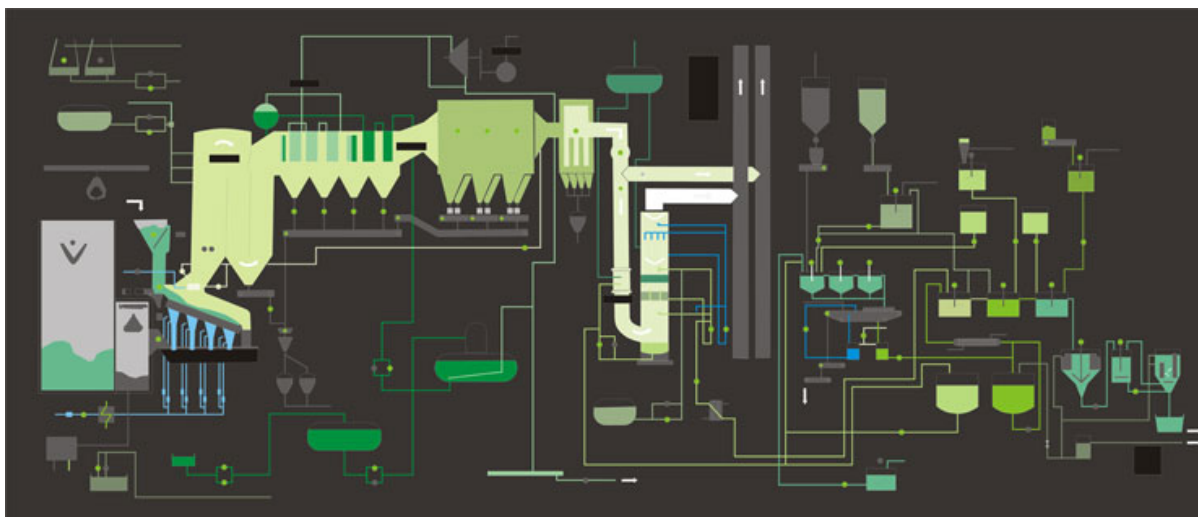
- použití nejmodernější technologie BAT²,
- bezpečné plnění nejpřísnějších emisí do ovzduší, vody a půdy,
- noPOPs – termická likvidace vstupních POPs³ a katalytický rozklad ve spalínách,
- vysoká účinnost kogenerační výroby tepla a elektřiny,
- náhrada primárních surovin – uhlí, mazut, cement, rudy železa a barevných kovů,
- snížení emise plynů – CO₂, metan,
- vyloučení kontaminace podzemní pitné vody.

² the **Best Available Technology** = nejlepší dostupná technologie
BAT představuje nejlepší dosud vynalezené technologie dostupné z hlediska technického a ekonomického (o BAT se často hovoří v případě, že se jedná o řešení problému zasahujícího negativně do životního prostředí)

³ **Persistent Organic Pollutants** = perzistentní organické látky
Skupinu organických látek vyrobených člověkem, které se v přírodě nerozkládají a mají schopnost dlouhodobě setrvávat v prostředí. V naprosté většině se jedná o látky jedovaté, způsobující různé hormonální poruchy nebo rakovinné bujení (nejznámější zástupci jsou dioxiny, furany nebo polychlorované bifenylly).

2.1 Popis technologie

Zařízení pro termické využití odpadů (TVO) je složeno z jedné technologické linky, jejíž projektovaný výkon zpracování odpadu činí 12 t/h (96 kt/r) a energeticky využívá komunální i živnostenský odpad s charakterem komunálního odpadu. Využitím kalorického obsahu zpracovávaného odpadu lze dosáhnout výrobu elektrické energie až 2,5 MW a výrobu tepelné energie až 23.0 MW.



Obr. 2 Základní technologické schéma zařízení na energetické využití odpadů [2]

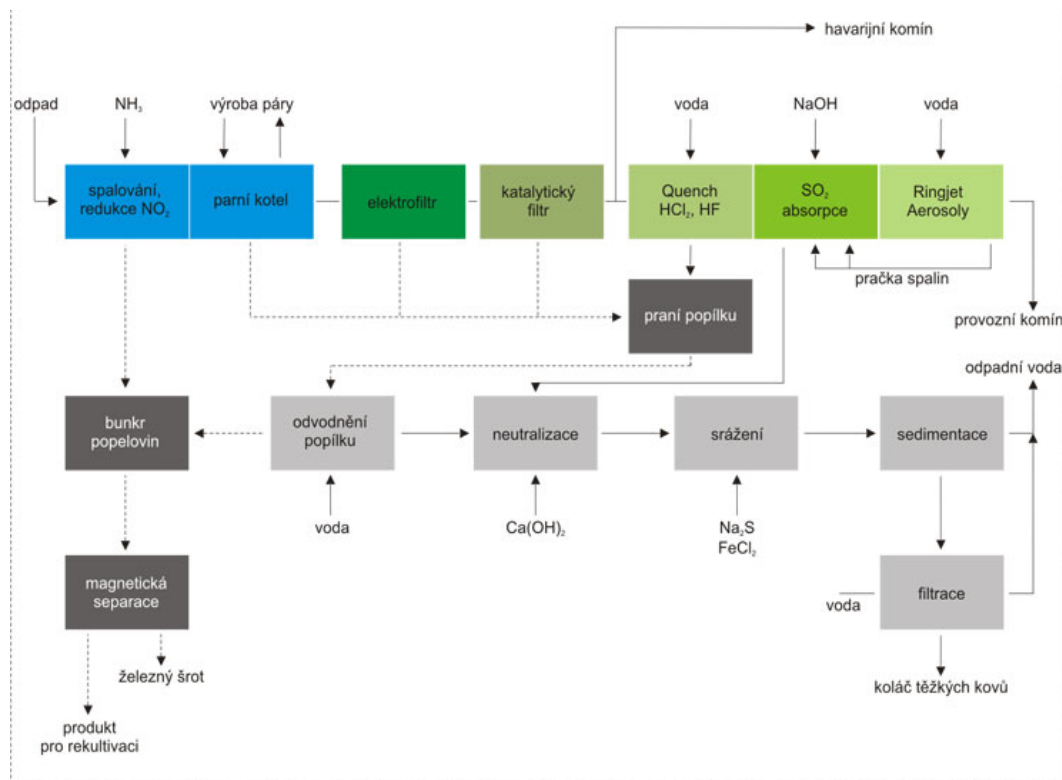
Spalování odpadu probíhá ve spalovacím zařízení (obr. 2) složeného z pohyblivých roštů, hydraulické stanice a topeniště. Regulace výkonu kotle je automatická. Kotel je napájen napájecí vodou, která se přivádí z čerpacích stanic jako *demi voda*⁴. V samotném ohništi je dosaženo teplot v rozmezí 850 - 1100 °C, v němž dochází k termicko-oxidačnímu rozkladu odpadu na jednotlivé složky (aby došlo k dokonalému rozkladu organických látek, je nutné setrvat dvě sekundy při teplotě 850 °C). [2,3]

Primární spalovací vzduch je předehříván na teplotu cca 140 až 160 °C a je zaváděn pod rošt. Sekundární spalovací vzduch není předehříván a slouží k ochlazování stěn spalovací komory a do spalovacího prostoru vstupuje s teplotou cca 60 až 80 °C. Výraznou měrou se tak zabráňuje tvorbě tzv. „nápeků“, které snižují spolehlivost a fond provozní doby. Třetím proudem plynu zaváděného do spalovací komory je recykl částí spalín, který je zaváděn do spalovacího prostoru nad rošt [3].

Tepelný obsah vznikajících spalín je v kotli na odpadní teplo využíván k výrobě přehřáté páry (4,1 MPa, 400 °C), která se přes protitlaku turbínu (generování energie) dodává do teplárenské soustavy (1,0 MPa, 230 °C). Tím je umožněna současná výroba elektrické a tepelné energie. Část vyrobené páry a elektrické energie je použita pro krytí vlastních potřeb provozu. Většina vyrobené energie je ale exportována do elektrické a tepelné sítě.

⁴ **Demineralizovaná voda** taky **deionizovaná voda** je voda zbavená všech iontově rozpustných látek a křemíku (obvykle se vyskytující ve formě oxidu křemičitého). Její *konduktivita* (měrná elektrická vodivost) je nižší než $0,1 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (základní jednotka *siemens na metr* $\text{S}\cdot\text{m}^{-1} = \Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$). Připravit se dá například použitím ionexu (měnič iontů).

Spaliny se po průchodu kotlem ochladí na cca 200 °C. Společně s nimi je ze spalovacího procesu strhávána převážná část jemného popílku, který je zachytáván ve filtračním okruhu za parním kotlem. Celý koloběh odpadů a jeho produktů je přehledně znázorněn v blokovém schéma na *obr. 3*.



Obr. 3 Blokové schéma spalovny Termizo a.s. [2]

Základní parametry spalovny TERMIZO a.s. jsou shrnuty v *tab. 1*.

Tab. 1 Základní údaje zařízení [2]

Druh odpadu:	směsný komunální a živnostenský odpad
Bunkr odpadu:	2400 m ³ pro komunální odpad 600 m ³ pro objemový odpad
Zpracovatelský výkon:	12 t/h , 96000 t/r
Fond provozní doby:	8000 h/r
Výhřevnost odpadu:	6,5 – 12,5 MJ/kg
Maximální trvalý tepelný výkon:	30,6 MW
Spalovací teplota:	900 – 1130 °C
Teplota v 1. tahu kotle, za posledním přívodem spalovacího vzduchu:	850 – 950 °C
Zdržení spalin při teplotě 850 °C po posledním přívodu sek. vzduchu:	2 s (min.)
Obsah O ₂ ve spalinách:	6 % (min.)
Jmenovité množství vyrobené páry:	36 t/h
Parametry vyrobené páry:	4,1 MPa /400 °C
Výroba elektrické energie:	2,5 MW (protitlak 1 -1,1 MPa)
Výroba tepelné energie:	23,0 MW (do stávajícího systému dálkového topení)

2.1.1 Protitlaká parní turbína

Princip parní turbíny spočívá v přeměně tepelné energie obsažené v páře na energii pohybovou, která vyvozuje točivý moment na hřídeli. Turbíny jsou pak převážně řešeny jako mnohostupňové se stupni řazenými za sebou. Každý stupeň má pevné rozváděcí a oběžné rotující ústrojí. Pára pak působením na lopatky rotoru vyvozuje moment vůči hřídeli.

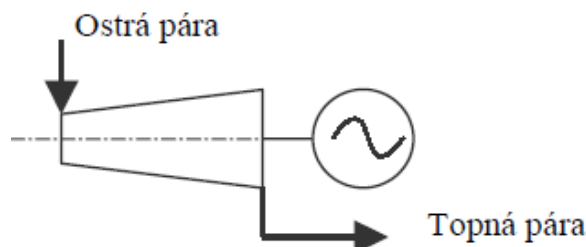
V našem případě je v kotli vyrobená vysokotlaká pára vedena do parní protitlaké turbíny (obr. 4), která pohání generátor na výrobu elektrického proudu. Pára se po průchodu turbínou mění na nízkotlakou, jež se využívá jako zdroj tepla.

Výhodou tohoto stroje je vysoká energetická účinnost, nevýhodou však přímá závislost výroby elektrické energie na dodávkách tepla. Z pozice elektrizačního a distribučního řízení soustavy se jedná o tzv. vynucenou výrobu elektrické energie. V protitlakých turbosoustrojích tedy s instalovaným výkonem nelze libovolně manipulovat, okamžité hodnoty dodávek z těchto zdrojů se pouze akceptují. [6]

Z důvodů menší poptávky po teple v letních měsících (zájem o elektrickou energii je oproti tomu po celý rok prakticky stejný) bude do provozu spalovny Termizo a.s. zapojena parní kondenzační turbína. V letním období by tak byla v chodu buď menší kondenzační turbína (max. výkon 18 t/h), což by znamenalo výrobu pouze elektrické energie, nebo by stávající protitlaková turbína (max. výkon 36 t/h) byla s kondenzační zapojena kontinuálně. Vše by záleželo na množství dodaného odpadu a poptávce po konkrétním druhu energie.

Problém, který se zavedením nového prvku do stávající technologie nastane, je vhodná kombinace režimu obou turbín pro získání maximálního finančního efektu. Spalovna také při

chodu pouze kondenzační turbíny přijde o dotace, které dostává za provoz kogenerační jednotky. Tato problematika bude v průběhu práce ještě rozvinuta. Nová kondenzační turbína by měla být uvedena do provozu 1. 7. 2009.



Obr. 4 Protitlaké parní turbosoustrojí [5]

Vlastnosti parní turbíny:

Na základě vstupních a požadovaných výstupních parametrů páry (T , p) byly s pomocí parních tabulek dopočítány hodnoty entropie a entalpie páry (viz tab. 2). Množství produkované páry v kotli bylo stanoveno jako průměrná hodnota dat pára z kotle z provozního deníku. Technologická spotřeba páry je rozdíl vyráběné a exportované páry a účinnost parní turbíny η_t [-]. Účinnost lze odvodit z množství vyrobené elektřiny (výpočet uveden na konci kapitoly (9))

Účinnost generátoru η_{gen} [-] byla brána jako v praxi používána přibližná hodnota zařízení tohoto typu.

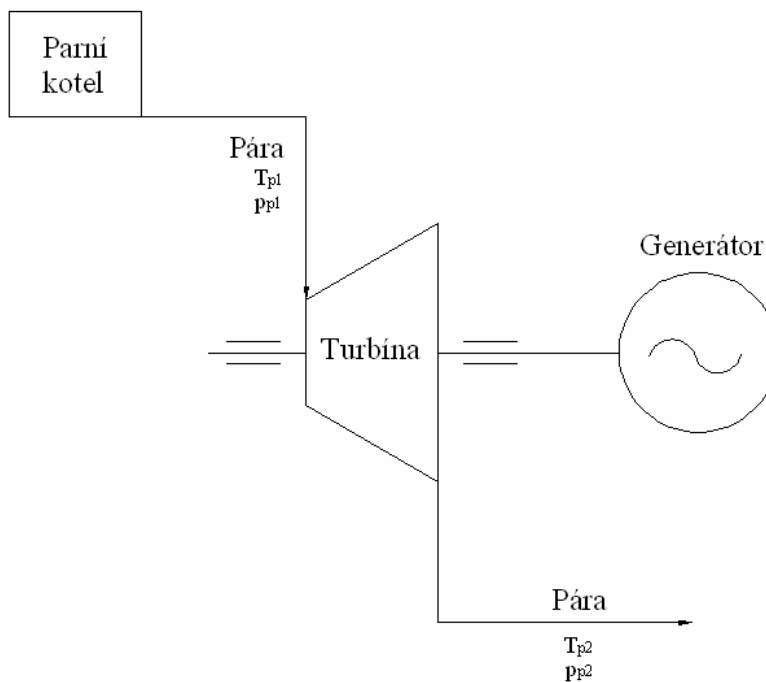
Tab. 2 Vstupní parametry

Teplota páry T_{p1}	[°C]	400
Tlak páry p_{p1}	[MPa]	4,1
Entropie páry s_{p1}	[kJ/kg°C]	6,76
Entalpie páry i_{p1}	[kJ/kg]	3 214,01
Efektivní entalpie páry i_{ef}	[kJ/kg]	216,46
Saturační teplota	[°C]	251,8
Teplota zástřikové vody	[°C]	125
Množství produkované páry v kotli	[kg/hod]	33 767,24
Technologická spotřeba páry	[%]	19,66
Účinnost parní turbíny η_t	[%]	68,45
Výkon generátoru	[MW]	1,9897
Účinnost generátoru η_{gen}	[%]	98

V parních tabulkách byla při dosazení výstupních hodnot páry dopočítána i entropie a entalpie páry na výstupu (viz tab. 3).

Tab. 3 Výstupní parametry

Teplota páry dodávaná do teplárny T_{p2}	[°C]	230
Požadovaný výstupní tlak páry p_{p2}	[MPa]	1
Entropie páry s_{p2}	[kJ/kg°C]	6,84
Entalpie páry i_{p2}	[kJ/kg]	2 897,78
Saturační teplota	[°C]	179,9


Obr. 5 Schéma zapojení parní turbíny []

Z těchto údajů již lze vypočítat *teoretický* (1) a *efektivní entalpický spád páry* Δi [kJ/kg] (2).

$$\Delta i_{teoret.} = i_{p1} - i_{p2} \quad (1)$$

$$\Delta i_{teoret.} = 3214,01 - 2897,78$$

$$\Delta i_{teoret.} = 316,23 \text{ kJ / kg}$$

$$\Delta i_{efekt.} = \Delta i_{teoret.} \cdot \frac{\eta_T}{100} \quad (2)$$

$$\Delta i_{efekt.} = 316,23 \cdot \frac{68,45}{100}$$

$$\Delta i_{efekt.} = 216,46 \text{ kJ / kg}$$

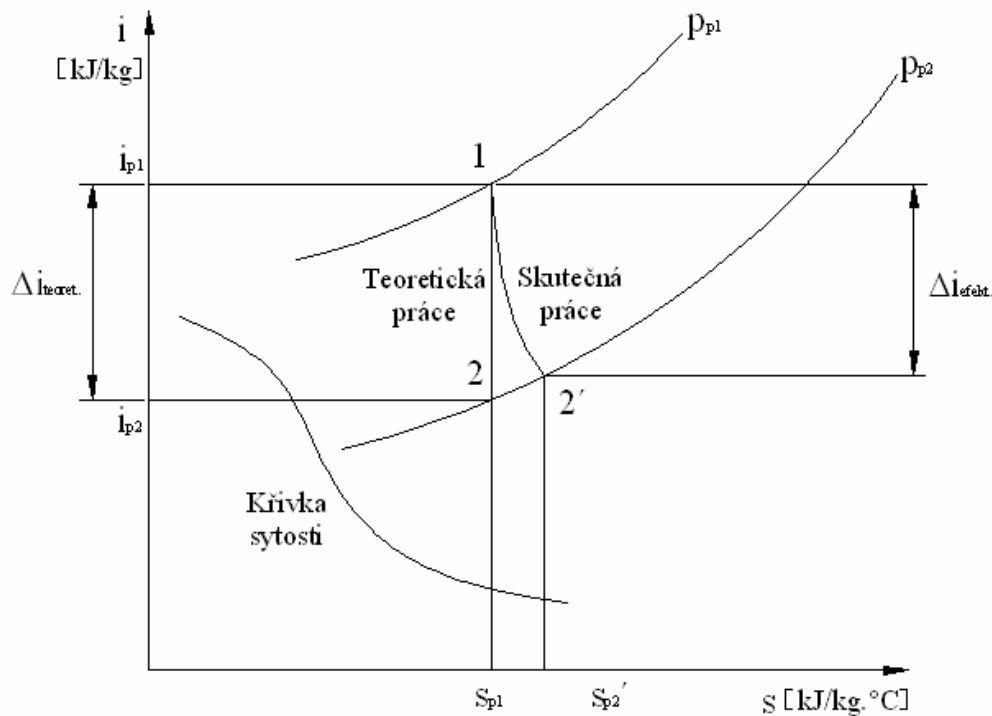
Nyní je možné dopočítat i skutečnou entalpie páry na výstupu i_{p2skut} [kJ/kg] (3).

$$i_{p2skut} = i_{p1} - \Delta i_{efekt.} \quad (3)$$

$$i_{p2skut} = 3214,01 - 216,46$$

$$i_{p2skut} = 2997,55 \text{ kJ / kg}$$

V i-s diagramu (obr. 6) je expanze páry na turbíně přehledně znázorněna.



Obr. 6 Expanze páry v turbíně (i-s diagram) [5]

Elektrický výkon turbíny P_{el} [kW_{el}] (4) se získá vynásobením efektivního entalpického spádu $\Delta i_{efekt.}$ [kJ/kg] s množstvím páry přiváděné na turbínu $m_{pára \text{ do TLib}}$ [kg/hod]. Ve výpočtu se zohlední i účinnost generátoru.

$$P_{el} = \Delta i_{efekt.} \cdot m_{pára \text{ do TLib}} \cdot \frac{\eta_{gen}}{100} \quad (4)$$

$$P_{el} = 216,46 \cdot \frac{33767,24}{3600} \cdot \frac{98}{100}$$

$$P_{el} = 1989,74 \text{ kW}_{el}$$

Tepelný výkon turbíny P_t [kW] (5) se už vyjádří pouze jako součin množství páry přiváděné na turbínu a skutečné entalpie páry na výstupu, ztráty na turbíně se v tomto případě zanedbaly.

$$P_t = m_{\text{pára do TLib}} \cdot i_{\text{p2.skut}} \quad (5)$$

$$P_t = \frac{33767,24}{3600} \cdot 2997,55$$

$$P_t = 28\,116,39 \text{ kW}$$

Účinnost výroby elektřiny η_{el}^{CHP} [-] (6) [17] se vyjádří jako poměr elektrického výkonu ku energii dodané palivem E_w [kW]. Příkon paliva je řešen jako součin množství spalovaného odpadu a jeho průměrné výhřevnosti.

$$\eta_{el}^{CHP} = \frac{P_{el}}{E_w} \quad (6)$$

$$\eta_{el}^{CHP} = \frac{1989,74}{33155,86}$$

$$\eta_{el}^{CHP} = 0,0600 [-]$$

Obdobně se řeší i účinnost výroby tepla η_t^{CHP} [-] (7) [17].

$$\eta_t^{CHP} = \frac{P_t}{E_w} \quad (7)$$

$$\eta_t^{CHP} = \frac{28116,39}{33155,86}$$

$$\eta_t^{CHP} = 0,8480$$

Celková účinnost kogenerace η_{celk}^{CHP} [-] (8) [17] je pak tedy:

$$\eta_{celk}^{CHP} = \eta_{el}^{CHP} + \eta_t^{CHP} \quad (8)$$

$$\eta_{celk}^{CHP} = 0,06 + 0,848$$

$$\eta_{celk}^{CHP} = 0,908 [-]$$

Tyto hodnoty patří mezi typické parametry kogeneračních zařízení [17].

Tab. 4 Parametry páry na turbíně

Isoentropický entalpický spád $\Delta i_{teoret.}$	[kJ/kg]	316,23
Efektivní entalpický spád $\Delta i_{efekt.}$	[kJ/kg]	216,46
Skutečná výstupní entalpie páry $i_{p2\ skut}$	[kJ/kg]	2 997,55
Množství páry přiváděné na turbínu $m_{pára\ do\ TLib}$	[kg/hod]	33 767,24
Energie obsažená v palivu E_w	[kW]	33 155,86
Elektrický výkon P_{el}	[kW _{el}]	1 989,74
Účinnost výroby elektřiny η_{el}^{CHP}	[%]	6,00
Tepelný výkon P_t	[kW]	28 116,39
Účinnost výroby tepla η_t^{CHP}	[%]	84,80
Celková účinnost kogenerace η_{celk}^{CHP}	[%]	90,80
Power-to-heat ratio ⁵	[-]	0,0708

Účinnost turbíny lze odvodit z množství vyrobené elektřiny jako poměr *efektivní entalpie páry* h_{ef} (výkon ku účinnosti generátoru) a *isoentropicko entalpického spádu* $\Delta i_{teoret.}$.

$$\eta_t = \frac{h_{ef}}{\Delta i_{teoret.}} \quad (9)$$

$$\eta_t = \frac{216,46}{316,23}$$

$$\eta_t = 0,6845 \text{ [-]}$$

⁵ **Power-to-heat ratio** je poměr elektrického a tepelného výkonu. Tato technická charakteristika, kterou je třeba definovat za účelem výpočtu množství elektřiny vyráběné formou kombinované výroby.

2.1.2 Parní kondenzační turbína

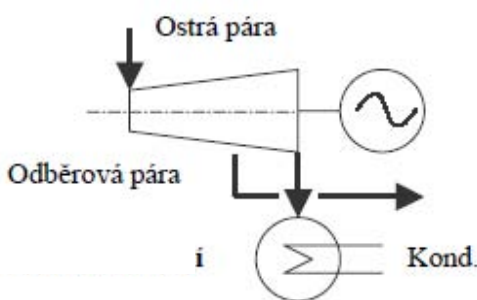
Kondenzační turbíny (*obr. 7*) jsou určeny pro přeměnu tepelné energie páry v mechanickou bez současné dodávky tepla. Z toho vyplývá snaha využít tepelnou energii obsaženou v páře co nejlépe. Proto kondenzační parní turbíny pracují na výstupu s hlubokým vakuem (3 až 8 kPa). Těmto tlakům odpovídá teplota sytosti 23 až 42 °C. Páru o těchto parametrech už nelze využít v dalším zařízení a je nutné ji nechat zkondenzovat. V kondenzátoru se tlak páry na konci expanze sníží jejím zchlazením.

Zvětšením tepelného spádu zpracovaného turbínou se zvýší tepelná účinnost oběhu a výkon. Při snižování tlaku jsme však omezeni měrným objemem páry, který se snižováním tlaku podstatně zvětšuje. Vzduch, který se do kondenzátoru dostane přes ucpávky hřídele turbíny, je z kondenzátoru odsáván vývěvou.

Umístění kondenzátoru vždy navazuje na výstup páry z nízkotlakého dílu turbíny.

Turbína má neregulované odběry páry pro regenerační ohřev napájecí vody. Tlak v těchto odběrech kolísá se zatížením [6].

Parametry nové kondenzační turbíny liberecké spalovny jsou shrnuty v příloze.



Obr. 7 Kondenzační parní turbosoustrojí [5]

2.2 Čištění spalin

Čištění spalin a odstranění nežádoucích složek se skládá ze čtyř technologických kroků [2]:

- redukce oxidů dusíku (NO_x),
- zachycení popílku,
- katalytický rozklad organických látek typu PCDD/F,
- čištění anorganických složek spalin.

Redukce oxidů dusíku

Ve spalovací komoře kotle, kde probíhá selektivní nekatalytická redukce (SNCR), je účinkem amoniaku (řízené množství roztoku čpavkové vody NH_4OH) odstraňováno nadlimitní množství oxidů dusíku. Redukce NO_x se uskutečňuje v teplotním rozsahu 850 – 950 °C. [2]

Zachycení popílku

Dalším krokem čištění spalin je elektrostatické odloučení převážné části zbytkového množství jemného popílku unášeného spalinami, které vystupují z kotle. Část takto očištěných spalin je pomocí recyklačního ventilátoru po průchodu elektrofiltrem recyklována zpět do spalovací komory. Zbývající spaliny jsou vedeny do bloku finálního dočištění. [2]

Katalytický rozklad organických látek typu PCDD/F

Na katalytickém textilním filtru Remedica (dioxinový filtr *obr. 8*) se zachytává zbytkový úletový popílek, který už prošel elektrofiltrem. Zpracováván je společně s popílkem jak z elektrofiltru, tak z kotle (v něm je za provozu periodicky oklepáván). [2]

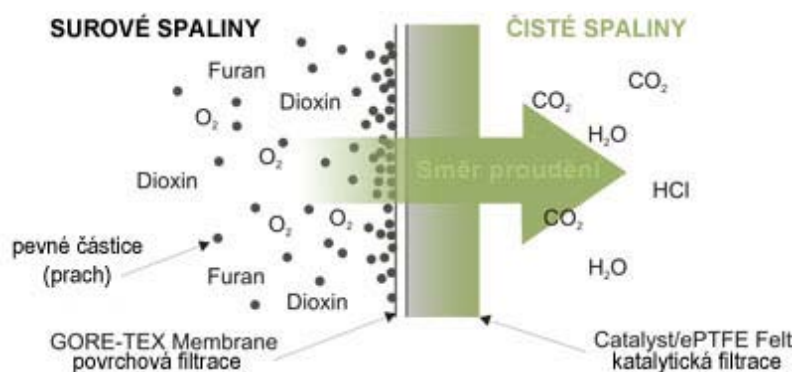


Obr. 8 Dioxinový filtr po montáži [2]

Princip metody likvidace emisí látek typu PCDD/F (polychlorovaných dibenzodioxinů a dibenzofuranů), ke kterému dochází v zařízení společnosti TERMIZO a.s. je schématicky znázorněn na *obr. 9*.

Katalytickému rozkladu předchází filtrace nejjemnějších prachových podílů jako u klasického textilního filtru. Regenerace se provádí automaticky po dosažení předepsané tlakové ztráty na filtru nebo v určených časových periodách.

Jeho výhodou je vysoká tepelná odolnost (až do 250 °C), neboť se používá tkanin na bázi speciálních fluorovaných polymerů. Metoda tedy oxiduje stopové koncentrace organických látek (nejen PCDD/F, ale i složité aromatické uhlovodíky) na neškodnou vodu, oxid uhličitý a chlorovodík, který se pak následně zachytává v pračce spalin. [2]



Obr. 9 Princip metody likvidace emisí látek typu PCDD/F [2]

Čištění anorganických složek spalin:

K čištění spalin mokrým chemicko-fyzikálním procesem (chemisorpce) ve třech stupních slouží pračka spalin.

První stupeň (quench + absorpce anorganických kyselin):

Horké spaliny jsou ochlazovány vstřikováním prací vody na teplotu jejich nasycení (přibližně 65°C). Spaliny tak jsou nasycovány vodou, která pohlcuje největší část anorganických kyselin (HCl a HF), odloučí se těžké kovy (např. Hg, Cd, Zn, Pb). [2]

Druhý stupeň - absorpce oxidů síry (SO₂, SO₃) ze spalin:

Výplň pračky zajistí intenzivní styk mezi spalinami a změkčenou vodou s regulovaným dávkováním hydroxidu sodného (NaOH).

Spaliny směřují zdola nahoru, takže prochází výplní proti proudu prací vody. Tím dochází k výměně látek a odstranění oxidů síry ze spalin (hodnot pH cca 6) ve výstupní prací vodě. [2]

Třetí stupeň (odlučování aerosolů):

Spaliny procházejí soustavou Venturiho trysek, kde zkrápěním tlakovou vodou probíhá proces odlučování aerosolů vznikajících při spalování a hlavně při redukčních procesech NO_x. Po opuštění třetího stupně čištění jsou spaliny vedeny přes výstupní odlučovač kapek a posléze vystupují speciálně konstruovaným komínem, kde se kontinuálně měří emise, do ovzduší. [2]

Shrnutí způsobů odstranění znečišťujících látek v odpadech je znázorněno v tab. 5.

Tab. 5 Odstranění znečišťujících látek [4]

Produkt spalování	Způsob odstraňování
CO ₂	finální produkty spalování
H ₂ O	
CO	režim spalování (3T)
popílek	mechanické čištění (filtrace)
SO ₂	chemické čištění (kontakt s alkalickými činidly)
HCl	
HF	
NO _x	termický, resp. katalytický DENOX
uhlovodíky, vč. POP	režimem spalování, adsorpce, rozklad
těžké kovy	filtrace + chemické čištění

2.2.1 Mokrý vypírka spalin s VENTURI pračkou

Při mokrému praní spalin pomocí Venturiho praček (*obr. 10*), které se používá ve spalovnách odpadů, se využívá proudového odlučování ve Venturiho trubici a skrápěcí kolony.

Proudový odlučovač pracuje na principu nástřiku vypírající kapaliny do proudu čištěného plynu. V něm se vypírací kapalina důsledkem intenzivní turbulence rozptýluje na jemné kapičky. Tím je dosaženo vysoké pravděpodobnosti kontaktu kapek s prachovými částicemi, což je podmínkou jejich odloučení. Velký mezifázový povrch je podmínkou také pro intenzivní sdílení tepla a případně i absorpci plynů během odlučování prachu.

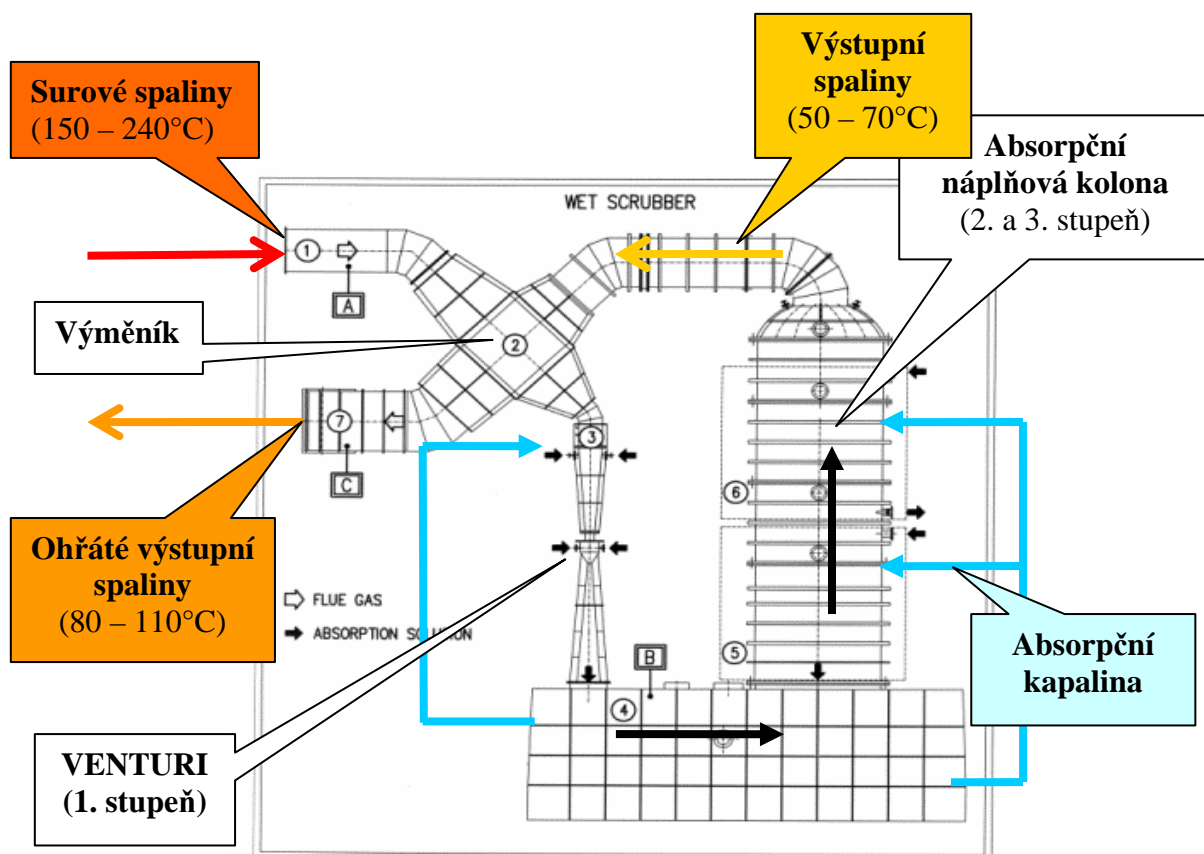
Absorpční kolona s výplní následuje za odlučovačem jako další absorpční stupeň.

Odlučivost proudových odlučovačů dosahuje 98 – 99 % i pro částice velikosti kolem 1 μm. Tyto parametry je řadí k nejúčinnějším mokrým mechanickým odlučovačům prachu [5].

2.3 Úprava odpadních vod

Upravována je voda z prvního a druhého stupně praní spalin, a také voda, která byla shromážděna ve skladovacích nádržích z různých technologických uzlů zařízení.

Čištěné vody prochází třemi nádržemi, do kterých se přivádí chemikálie (Ca(OH)₂, Na₂S, FeCl₃) potřebné k vyloučení těžkých kovů, které sedimentují do jemného kalu (vloček). V sedimentační nádrži (*obr. 11*) se kal usazuje, zatímco čirá voda teče do nádrže ke konečné kontrole před vypuštěním do kanalizace. Kal je dál propírán a odvodněn ve filtru. Vzniklý filtrační koláč se shromažďuje ve speciálních kontejnerech a odváží se k dalšímu zpracování před uložením na skládku nebezpečného odpadu [2].



Obr. 10 Uspořádání mokré vypírky spalin s Ventura pračkou [4]



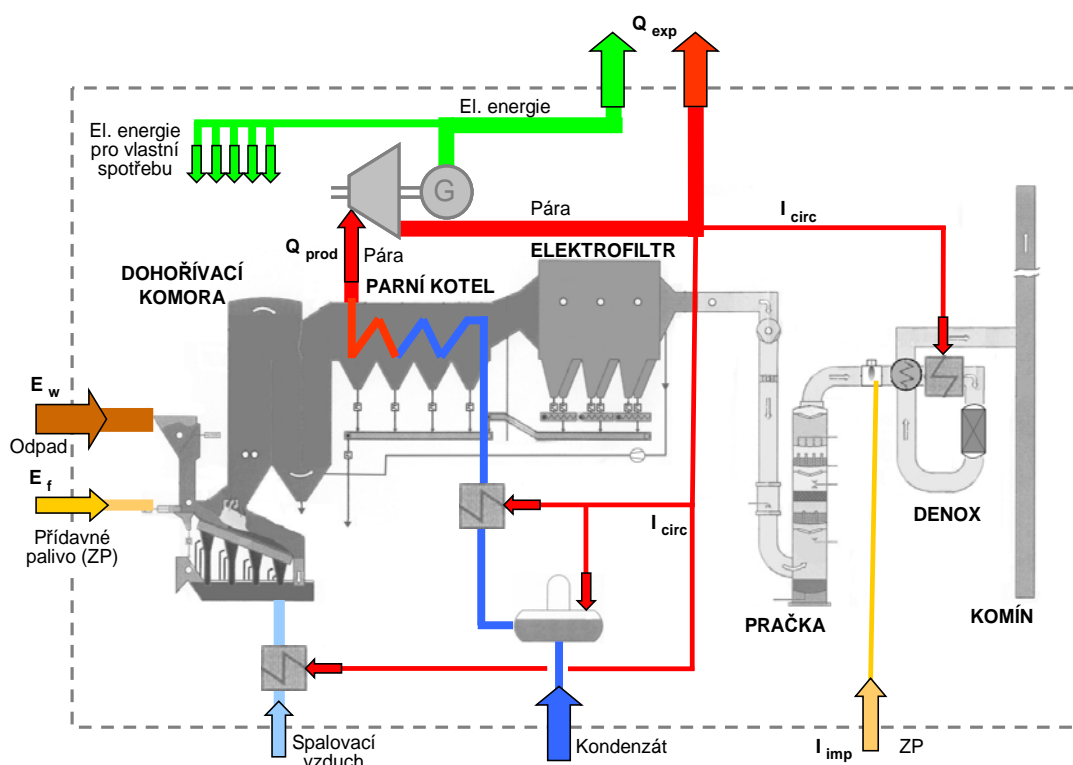
Obr. 11 Sedimentační nádrž ve spalovně Termizo, a.s. [2]

3 Materiálová a energetická bilance systému

Spalovna komunálního odpadu TERMIZO a.s., Liberec je moderním zařízením na energetické využití odpadů pro výrobu tepla, teplé vody a elektřiny pro domácnosti a firmy v Liberci.

V roce 2006 bylo spáleno více než 90 000 tun odpadů, ze kterých se vyrobilo teplo pro cca 13 600 domácností, čímž bylo nahrazeno přibližně 19 500 tun mazutu. Elektrickou energií bylo zásobeno zhruba 3 400 domácností (cca 7,4 GWh).[2]

Hlavní energetické toky pro spalovnu odpadů s výrobou energie jsou zjednodušeně znázorněny na obr. 12.



Obr. 12 Schematické znázornění hlavních energetických toků na spalovně odpadů s výrobou energie [8]

Hlavní vstupní energetický tok je představován kalorickým obsahem spalovaného odpadu (E_w), který závisí na jeho množství a výhřevnosti. Pokud není výhřevnost zpracovávaného odpadu postačující pro dosažení legislativně stanovené teploty spalování, je nutné pro udržení požadovaného teplotního režimu ve spalovacím prostoru používat přídavné palivo.

Zvýšená spotřeba přídavného paliva však zhoršuje ekonomii provozu spalovny a tudíž jsou stabilizační hořáky spalující přídavné palivo v provozu pouze po dobu nezbytně nutnou, například ve fázi náběhu na předepsané pracovní podmínky nebo při výrazném kolísání složení a výhřevnosti zpracovávaného odpadu. Teplo dodané přídavným palivem je označeno „ E_f “. [8]

Spaliny vystupující ze spalovacího prostoru při teplotách 850 až 1100 °C mají vysoký tepelný obsah a k využití jejich tepelného potenciálu dochází v aparátech sloužících k utilizaci tepla (výměníky tepla). Tepla spalin se využívá k výrobě přehřáté páry a následného generování elektrické energie při expanzi páry v protitlaké (kondenzační turbině). Dalším využitím vyrobené páry jsou ohřevy procesních proudů, které jsou součástí technologie. Vyrobená energie (Q_{prod}) je součtem vyrobené elektrické energie a tepelné energie určené jak pro export, tak pro cirkulaci. [8]

Ze strany využití je celkové množství vyrobené energie (Q_{prod}) členěno na část určenou pro export (Q_{exp}) buď ve formě elektrické energie nebo tepelné energie a na část sloužící pro vlastní provoz spalovny, tj. energii cirkulovanou (I_{circ}).

Podle vztahu (10) je zaveden **ukazatel efektivnosti výroby energie** PI_{ef} (*Plant Efficiency Factor*) [-] [7,16]:

$$PI_{\text{ef}} = \frac{Q_{\text{prod}} - (E_f + I_{\text{imp}})}{E_f + I_{\text{imp}} + I_{\text{circ}}} \quad (10)$$

Kde:

PI_{ef}	ukazatel účinnosti výroby energie (Plant Efficiency Factor) [-],
Q_{prod}	celková výše vyrobené energie, tepelné i elektrické energie [GJ/t],
I_{imp}	importovaná energie ve formě paliva nepodílející se na výrobě elektrické energie [GJ/t],
E_f	importovaná energie do spalovacího procesu, např. dodávka tepla podpurným palivem [GJ/t],
I_{circ}	energie cirkulovaná (elektrická i tepelná), která je nutná pro proces (energie pro elektromotory, ohřev spalovacího vzduchu, ohřev napájecí vody apod.) [GJ/t].

Plant efficiency factor definuje poměr mezi produkovanou energií získanou spalováním odpadu a spotřebou energie pro vlastní spalovací proces. Je-li PI_{ef} větší než jedna, znamená to, že zařízení vyrobí více energie než spotřebuje a tedy část získané energie může být exportována třetí straně. Spalovna tedy pracuje jako energetický zdroj.[17]

Při hodnocení energetického využití odpadů je dále prokazována skutečnost, zda je větší část odpadu a energie produkované jeho spalováním využita pro výrobu energie. Toto hledisko je posuzováno pomocí **ukazatele efektivnosti využití energie** η_e [%] (*Energy Utilization Rate*), vyjadřující podíl využití a uvolněné energie při zpracování odpadu. [8]

Kalkulace ukazatele efektivnosti využití energie se provádí podle vztahu (11) [16]:

$$\eta_e = \frac{Q_{\text{prod}} - (E_f + I_{\text{imp}})}{E_w \cdot f_B + E_f} \cdot 100 \quad (11)$$

Kde:

- Q_{prod} celková výše vyrobené energie, tepelné i elektrické energie [GJ/t],
 I_{imp} importovaná energie ve formě paliva nepodílející se na výrobě elektrické energie [GJ/t],
 E_f importovaná energie do spalovacího procesu, např. dodávka tepla podpurným palivem [GJ/t],
 E_w energie uvolněná spalováním odpadu [GJ/t],
 f_B koeficient stupně vyhoření hořlaviny ve zpracovávaném odpadu [-].

Aby mohl provozní soubor spalování odpadů být zařazen do kategorie *energetického využívání odpadů*, má být dosažená hodnota tohoto ukazatele vyšší než 0,6, eventuálně podle pozdějších návrhů [18] u zařízení schválených po 31.12.2008 vyšší než 0,65. [14]

Shrnutí podmínek pro kategorizaci způsobu termického zpracování odpadu dle kvantifikovaných kritérií [8] jsou uvedeny v *tab. 6*.

Tab. 6 Podmínky pro kategorizaci způsobu termického zpracování odpadu

Energetické využití odpadu	Odstraňování odpadu
$PI_{ef} > 1$	$PI_{ef} < 1$
$\eta_e > 60 \%$	$\eta_e < 60 \%$

Názorné vyhodnocení dat bylo provedeno na hodnotách z roku 2007, které představují nejnovější poskytnuté údaje (*tab. 7*).

Tab. 7 Vyhodnocení ukazatelů efektivnosti výroby a využití energie za období 01/2007 až 09/2007 [14]

Položka		Jednotka	Hodnota		
Množství zpracovaného odpadu		t	71409		
Výroba páry		t	237504		
Spotřeba zemního plynu		m ³	63070		
Nákup tepelné energie		GJ	3291		
Nákup elektrické energie		MWh _{el}	200,4		
Celkové toky energií za sledované období 01/2007 - 09/2007					
Položka		Označ.	GJ	MWh	MWh
Teplo dodané odpadem		E _w	809778	-	224938
Celkové vyrobené teplo		Q _{prod}	753040	-	209178
z toho	export tepelné energie	-	552260	-	153406
	tepelná energie pro vlastní spotřebu	E _{circ,heat}	92821	-	25784
Celková výroba el. energie		-	-	14 205	37382
z toho	export elektrické energie	-	-	6 193	16296
	podíl vyrobené el.energie pro vlastní spotřebu	E _{circ,el.}		8 012	21085
Tepelné ztráty na turbině		-	-	-	15784
Celkový export energie		Q _{exp,celk}		-	169702
Celková vlastní spotřeba el. energie		-	-	8 213	-
Importovaná energie (dodávka tepla podpurným palivem)		E _f	2144	-	596
Import elektrické enegie		I _{imp, e}	-	200	527
Nákup tepelné energie		I _{imp,h}	366	-	102
Celkový import enegie (mimo E _w a E _f)		I _{imp}	-	-	629
Celková cirkulující energie		I _{circ,celk} ·	121666	-	46869
Stanovení faktorů efektivnosti výroby a využití energie					
ukazatel efektivnosti výroby energie		PI _{EF} *			3,82
ukazatel efektivnosti využití energie		η _e			0,95

Pozn: * ... s preferencí exportované tepelné energie koeficientem 1,0987

3.1 Vstupní proudy

Odpad:

Využití směsného komunálního a živnostenského odpadu podle legislativních pravidel ČR a EU v objemu zhruba 50 % produkovaných spalitelných odpadů ve spádové oblasti. [10]

Přibližné složení KO je naznačeno v tab. 8.

Tab. 8 Charakteristické zastoupení složek komunálního odpadu, včetně výhřevností složek [8]

Druh odpadu	Obsah ve směsném KO (% hm.)		Typická výhřevnost MJ/kg
	min	max	
Papír	9	16	12-17
Textil	1	9	10-15
Plasty	1	10	28-35
Přez	1	7	34
Kuchyňský odpad	22	56	5-8
Znečištěná suť	2	6	0-4
Jiné odpadní materiály	10	20	-

Demineralizovaná voda:

Demi voda, připravovaná v sousední městské teplárně ionexovou technologií, ze které se vyrábí vysokotlaká pára pro následnou výrobu elektrické energie a tepla. [2,10]

Zemní plyn:

Využívá se pouze při najíždění a odstavování technologie tak, aby emise do ovzduší byly minimální (neslouží tedy jako přídatné palivo, pouze výjimečně pro stabilizaci hoření). [2]

Dodatkové chemikálie:

Chemikálie používané při čištění spalin a odpadních vod. Patří sem rovněž látky pro úpravu kotelních vod. [2]

3.2 Výstupní proudy

Spaliny:

Kvalita vyčištěných spalin se měří jednak kontinuálním analytickým zařízením (SO_2 , NO_x , HCl, tuhé emise, CO), jednak v zákonem určených termínech autorizovanými laboratořemi na měřicím zařízení, které je na komíně zabudované pouze po dobu měření. Tento způsob měření se provádí kvůli speciálním analýzám, které pro jejich složitost nelze měřit kontinuálním způsobem nebo pokud jsou extrémní požadavky na přesnost měření.

Zařízení na energetické využití komunálních odpadů nahrazuje teplo vyrobené sousední Teplárnou Liberec, čímž snižuje emise hlavních znečišťujících složek (především oxidů síry a dusíku). [10]

Procesní vody:

Tyto vody vznikají při praní spalin chemikáliemi (demineralizovaná voda, hydroxid sodný) a v procesu praní, resp. vyluhování popílku, kdy se z popílku vymývají toxické kovy (Zn, Cd, Ni, Pb, Cu) kyselým roztokem obsahujícím kyselinu chlorovodíkovou a další chloridy.

Vyčištěná voda se vypouští do veřejné kanalizace a společně s ostatními splaškovými vodami odchází do městské čistírny odpadních vod, kde voda projde ještě jedním čištěním. [10]

Pevné odpady:

Hlavní podíl pevných výstupů tvoří vyhořelá struska, vystupující z kotle, spolu s vyčištěným popílkem odděleným ze spalin (*obr. 13*).

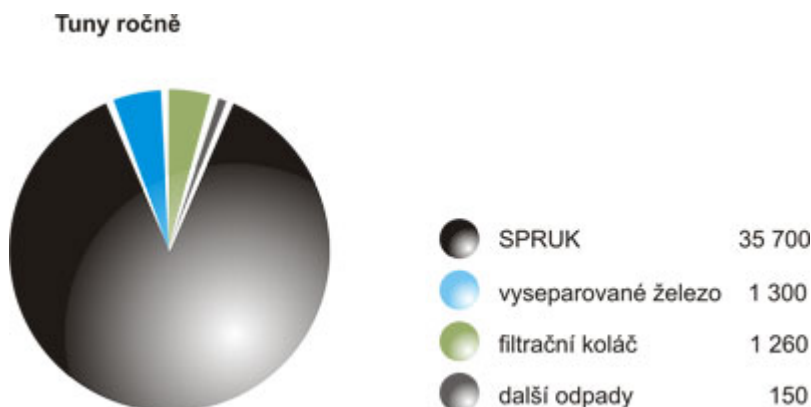


Obr. 13 Složení produkovaného odpadu v roce 2004 [10]

Tento odpad byl dříve ukládán na skládku, od roku 2005 je však využíván ke stavebním účelům.

Společnosti Termizo byl udělen certifikát pro výrobek s názvem "Směs popelovin pro rekultivaci a úpravu krajiny" (SPRUK). Tento produkt vykazuje podobné vlastnosti jako chudý beton. Po třech dnech probíhá jeho vytvrzení tak, že je vhodný pro konstrukční stavební násypy a zásypy. [10]

Dochází tak k minimalizaci produkovaných odpadů ve prospěch nových výrobků (*obr. 14*).



Obr. 14 Složení produkovaného odpadu []

Tímto opatřením došlo ke snížení množství produkovaného odpadu o 96 %. Ročně se uplatní zhruba 31 500 tun rekultivačního materiálu jako náhrada primárních stavebních surovin a až 1 800 tun železného šrotu lze recyklovat do hutí. Jsou tak splněny priority ochrany životního prostředí, kdy se maximální množství odpadů (pokud již vznikly) materiálově využívají, čímž se šetří primární přírodní zdroje. [2,10]

Filtrační koláč:

Další významnější druh produkovaného odpadu je filtrační koláč z čištění plynů. Ten vzniká v technologii čištění procesních vod a obsahuje nebezpečné složky ze spalín a těžké kovy vyluhované v procesu čištění popílku.

Tento materiálový výstup se předává pověřené firmě jako nebezpečný odpad a je přepracováván takovým způsobem, aby ho bylo možné uložit na zabezpečenou skládku nebezpečného odpadu. V případě Liberecké spalovny je tento odpad zpracovaný solidifikací, tj. stabilizací toxických složek speciální recepturou (přidáním cementu). [10]

Další odpady:

Při periodickém čištění kotle prováděném v odstávce zařízení a při čištění prostorů navazujících na topeniště kotle vzniká jako odpad nečištěný popílek. Ten je po přepracování (solidifikací) také uložen na skládku nebezpečných odpadů.

Mezi zbývajících odpady patří např. odpadní oleje, které jsou předávány k materiálovému využívání a recyklaci, poškozené zářivky a čisticí tkaniny. [10]

Tepelná a elektrická energie:

Spalovna TERMIZO je energeticky soběstačná, import energie ve formě odběru zemního plynu je minimální a je využíván pouze ve fázích najíždění a odstavování spalovny z provozu, resp. pro výjimečné řešení nouzových situací. Totéž se týká dodávky elektrické energie z externí rozvodné sítě, které slouží pouze v ojedinělých případech ke stabilizaci provozu spalovny. [13]

4 Analýza dat z provozního deníku

Jednotky pro termické zpracování odpadů (spalovny odpadů), které jsou doplněné o systém využití odpadního tepla, lze v současné době řadit mezi moderní energetické zdroje produkující čistou energii z alternativních zdrojů energie. Primárním úkolem spaloven je tedy bezpečným a k životnímu prostředí šetrným způsobem zpracovat dané množství odpadů, při kterém dochází k uvolnění značného množství tepla. Ve srovnání s konvenčními zdroji energie, u kterých je množství vyrobené energie (elektrické, popř. tepelné) řízeno jejich spotřebou, je u spaloven odpadů situace jiná, vzhledem k výše zmíněné primární funkci zařízení.

Hledá se proto způsob, jak vyrobené teplo co nejúčelněji využít a pokusit se vyhnout situacím, kdy je uvolněné teplo bez užítu mařeno. Na základě provozních dat z předchozích období bude navrhnout optimální provozní režim tak, aby bylo dosaženo maximálních finančních zisků.

V následujícím textu proto budou shrnuty výsledky analýzy dat z provozního deníku. Získané informace o zařízení a výsledky pak budou použity pro matematický model k vyčíslení zisku z prodeje energií a ze spalování odpadu.

4.1 Výkon spalovny

K vypracování praktické části práce byla k dispozici data z provozního deníku spalovny z let 2002 – 2007. Průměrné hodnoty mají spíše informativní funkci. Při výpočtech se však používají detailněji zpracovaná data.

V *tab. 9* je znázorněno roční množství zpracovaného odpadu, následně vyrobené páry, spotřeby zemního plynu a provozní doby. Hodnoty jsou sice určeny pro roční bilanci, nejsou však brány v rozmezí jednoho kalendářního roku. Pro názornou ukázkou to nicméně nemá zásadní vliv.

Hodnoty zpracovaného odpadu naznačují vzrůstající trend. Spalovna, jejíž projektovaný výkon zpracování odpadu činí 96 000 t/rok, tak stále pracuje s určitou minimální rezervou. Problémem současnosti je totiž stále se zvyšující výhřevnost komunálního odpadu, způsobená především nekvalitním tříděním. Odpad se dostává na samou horní hranici výhřevnosti, pro niž je zařízení projektováno. Ve spalovacích komorách jsou příliš vysoké teploty, což přináší celou řadu technických problémů. Spalovna také nemůže přijmout tolik odpadu, kolik by bylo při nižší výhřevnosti možné.

Množství vyrobené páry je závislé na spáleném odpadu a jeho výhřevnosti. Obecně lze říci, že páry se vyrobí trojnásobné množství dodaného odpadu.

V případě nízké výhřevnosti odpadu⁶ a hrozbě, že by teplota ve spalovací komoře klesla pod minimální hodnotu kvalitního spalování 850 °C [7], bývá jako pomocné palivo používán

⁶ Hranicí pro spalování tuhého odpadu bez přívodu podpůrného paliva se uvádí **minimální výhřevnost odpadu 3,6 MJ/kg**. Tato minimální hodnota výhřevnosti může být dosažena i při poměrně vysokém obsahu balastních komponent v odpadu (vody a nespalitelných podílů), jejichž podíl může dosáhnout až 75 % hm.

zemní plyn. Tím je topeno také v případě, že kotel po odstávce najíždí do provozu (trvá cca 8 hodin, než je kotel vyhřátý na potřebnou teplotu).

Fond provozní doby činí 8 000 h/rok, přičemž je celý technologický řetězec dimenzován pro nepřetržitou provozní periodu 7 000 hodin [8].

Maximální navýšení provozní doby je podmíněno bezporuchovým chodem. Zde jsou konfrontovány různé varianty optimalizačních řešení. Na jedné straně stojí provoz zařízení na maximální výkon kotle, při kterém je finanční efekt z prodané energie nejvyšší. V opozici je skutečnost nadměrného opotřebování a zanášení technologie, snížení spolehlivosti, jakož i pravděpodobnosti bezporuchového chodu. V části *Matematický model* budou tyto faktory optimalizace ještě rozebrány.

Z hodnot provozního deníku je patrné, že spalovna fond pracovní doby splňuje, ve většině případů překračuje. Zařízení tedy nemusí být pro poruchy zbytečně odstavováno.

Tab. 9 Výkonové a spotřební charakteristiky provozu spalovny TERMIZO

Období	Zpracovaný odpad (t)	Výroba páry		
		výroba páry (t)	průměrná hodinová výroba páry (t/h)	měrná výroba páry (t/t)
10/2004 až 09/2005	91 049	286 971	34,340	3,152
10/2005 až 09/2006	92 361	287 437	35,950	3,112
10/2006 až 09/2007	94 911	313 813	37,972	3,306
průměr	92 774	296 074	36,087	3,190

Období	Provozní doba (h/r)	Spotřeba zemního plynu		
		spotřeba ZP (m ³)	průměrná hodinová spotřeba ZP (m ³ /h)	měrná spotřeba ZP (m ³ /t)
10/2004 až 09/2005	8 358,000	107 487	12,900	1,181
10/2005 až 09/2006	7 995,000	155 201	19,400	1,680
10/2006 až 09/2007	8 264,380	63 070	7,632	0,665
průměr	8 205,793	108 586	13,311	1,175

Ze srovnání hlavních výkonových a spotřebních ukazatelů spalovny TERMIZO za sledované období je znatelný zvyšující se zpracovatelský výkon. Souběžně se zvyšuje i výroba tepla vyjádřená primární produkcí přehřáté páry, což souvisí jak se zvýšeným zpracovatelským výkonem, tak se zvyšující se výhřevností směsného odpadu. [14]

Směsný komunální odpad obvykle vykazuje výhřevnost v rozmezí cca **6,5 až 12 MJ/kg**. Pro toto rozmezí byla projektována i spalovna TERMIZO [8].

4.2 Dostupnost odpadu

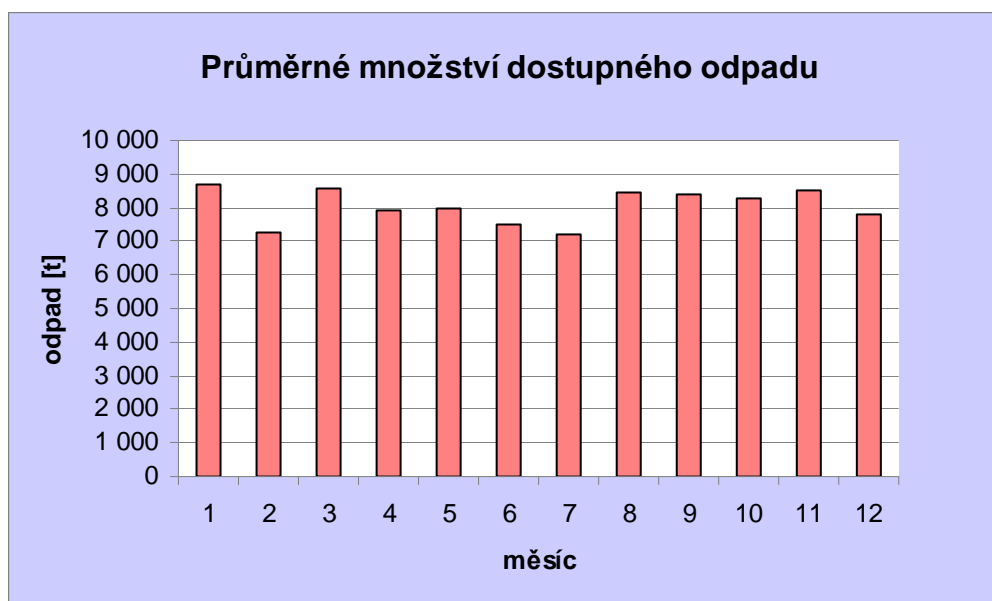
Množství dostupného odpadu představuje další sledovanou veličinu. Ta však není posuzována z pohledu celkového ročního objemu, který se vzhledem ke kapacitě spalovny významně nemění, ale z měsíčních hodnot zpracovaného odpadu. Vycházelo se z předpokladu, že množství zpracovaného odpadu odpovídá množství dovezeného odpadu v měsíci.

Tato domněnka byla při konzultaci s odbornými pracovníky společnosti Termizo a.s. potvrzena a bylo také naznačeno, že množství dovezeného odpadu je proměnné v závislosti na ročním období. Tuto hypotézu však bylo nutné podrobit statistickému rozboru, který by rozhodl, je-li proměnnost množství dostupného odpadu v měsíci statisticky významná.

Průměrné množství dováženého odpadu ukazuje *tab. 10* a znázorňuje *obr. 15*. Uvedené hodnoty jsou vzhledem k neúplnosti dat z provozního deníku počítány jako průměrné hodinové údaje vynásobené počtem hodin v daném měsíci (jsou tím odstraněny nedostatky v datech – výpadky z provozu a chybějící hodnoty). Data tedy nejsou zcela přesná, ale k posouzení vlivu měsíce na množství dostupného odpadu pomocí analýzy rozptylu jsou postačující.

Tab. 10 Průměrné množství dostupného odpadu

	2002 [t]	2003 [t]	2004 [t]	2005 [t]	2006 [t]	2007 [t]	Průměr [t]
leden		7 453,36	7 682,44	8 681,70	10 443,93	9 295,01	8 711,29
únor		6 682,20	6 152,71	7 206,68	8 258,77	7 865,00	7 233,07
březen		8 857,50	7 862,27	8 911,07	9 071,72	8 151,54	8 570,82
duben		8 139,32	8 065,67	7 460,40	8 021,48	8 035,00	7 944,38
květen		8 266,99		7 709,08	7 652,20	8 261,00	7 972,32
červen		7 029,36		7 927,84	8 080,10	7 078,00	7 528,83
červenec		6 511,93		8 056,21	5 748,60	8 544,00	7 215,19
srpen		7 183,58		8 766,97	8 681,94	9 087,00	8 429,87
září		7 789,94		8 763,86	8 261,10	8 661,00	8 368,97
říjen		8 073,71	7 990,00	8 952,74	8 119,00		8 283,86
listopad		7 804,18	7 566,00	9 006,51	9 742,28		8 529,74
prosinec	8 355,48	7 419,95	6 148,21	9 029,95	7 896,29		7 769,98
průměr	8 355,48	7 601,00	7 352,47	8 372,75	8 331,45	8 330,84	8 046,53



Obr. 15 Průměrné množství dostupného odpadu v závislosti na měsíci v roce

4.2.1 Analýza rozptylu

Analýza rozptylu (Analysis of variance, ANOVA) je metodou matematické statistiky, která zkoumá závislosti spojité veličiny (Y) na veličině kategoriální (X). Veličina X bývá v tomto kontextu nazývána faktor a proto přesný název testu zní jednofaktorová analýza rozptylu, případně analýza rozptylu jednoduchého třídění.

Princip analýzy

Při statistickém testování se musí stanovit dvojice testovaných hypotéz H_0 (nulová hypotéza) a H_1 (alternativní, doplňková hypotéza). Následně se zvolí hodnota hladiny významnosti α , definovaná jako pravděpodobnost chyby prvního druhu (pravděpodobnost toho, že se kvůli případnému náhodnému vychýlení dat zamítne H_0 , pokud by přitom ve skutečnosti byla pravdivá). Nejčastěji se volí 5% hladiny významnosti, tedy $\alpha = 0,05$. [11]

Při analýze rozptylu testujeme na hladině významnosti α nulovou hypotézu, která tvrdí, že střední hodnoty pro každou úroveň faktoru jsou stejné proti alternativní hypotéze, která tvrdí, že aspoň jedna dvojice středních hodnot se liší [11].

Označíme-li $r \geq 2$ počet kategorií veličiny X a $\eta_1 = \dots = \eta_r$ střední hodnoty veličiny Y v jednotlivých X -ových kategoriích, pak testovanými hypotézami jsou:

$$H_0 : \eta_1 = \dots = \eta_r \text{ (aneb nezávislost } Y \text{ na } X),$$

$$H_1 : \text{non } H_0 \text{ (závislost } Y \text{ na } X).$$

Označení

Dále je použito následující označení [11]:

n_i ... počet pozorování v i -té kategorii,

$n = \sum_{i=1}^r n_i$... celkový rozsah všech r kategorií,

$X_{i.} = \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}$... součet hodnot v i -té kategorii,

$M_{i.} = \frac{1}{n_i} X_{i.}$... výběrový průměr v i -té kategorii,

$X_{..} = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}$... součet hodnot všech kategorií,

$M_{..} = \frac{1}{n} X_{..}$... celkový průměr všech r kategorií.

Testová statistika

Testová statistika je ve tvaru [11]:

$$F_A = \frac{S_A / f_A}{S_E / f_E}, \quad (12)$$

kde: $S_A = \sum_{i=1}^r n_i (M_{i.} - M_{..})^2$, $S_E = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - M_{i.})^2$, $f_A = r - 1$ a $f_E = n - r$.

Hypotézu H_0 tedy zamítneme na hladině významnosti α , když platí:

$$F_A \geq F_{1-\alpha}(r-1, n-r),$$

kde: $F_{1-\alpha}(r-1, n-r)$ je tabulková hodnota kvantilu Fisherova rozdělení⁷.

Pokud se na hladině významnosti α nulová hypotéza zamítne, určí se, které z dvojic středních hodnot se od sebe liší. K řešení tohoto problému slouží metody mnohonásobného porovnávání, např. Scheffého nebo Tukeyova [11].

V případě, kdy je $r = 2$, lze použít pro posouzení shody středních hodnot dvouvýběrový t - test.

Pozn.: Při použití statistického programu se výsledek testu většinou posuzuje pomocí p -hodnoty [11]. Platí, že nulovou hypotézu zamítáme na hladině významnosti α , právě když p -hodnota je menší než α .

⁷ **Fisherovo rozdělení** se používá pro posouzení rovnosti rozptylů dvou základních souborů. Kvantil nalezneme ve statistických tabulkách normovaného normálního rozdělení. Nemáme-li k dispozici podrobné statistické tabulky, určíme kvantily Fisherova rozdělení aritmetickým průměrem nejbližších hodnot [12].

Předpoklady o datech

V praxi tuto metodu nelze použít, pokud nejsou splněny dva důležité předpoklady jejího správného fungování: **normalita Y** a **shoda** (homogenita) **rozptylů Y** v jednotlivých kategoriích.

Normalita se ověřuje pomocí vhodného testu dobré shody (např. Kolmogorovův-Smirnovův test dobré shody), homogenitu lze ověřit pomocí tzv. Levenova testu [11,12]. V případě, kdy je X alternativní, tedy když nabývá pouze dvou kategorií, lze použít dvouvýběrový F-test.

4.2.2 Rozbor dat

K analýze rozptylu dat z provozního deníku byl použit statistický software MINITAB s jehož pomocí se stanovila závislost měsíce v roce na množství dostupného odpadu.

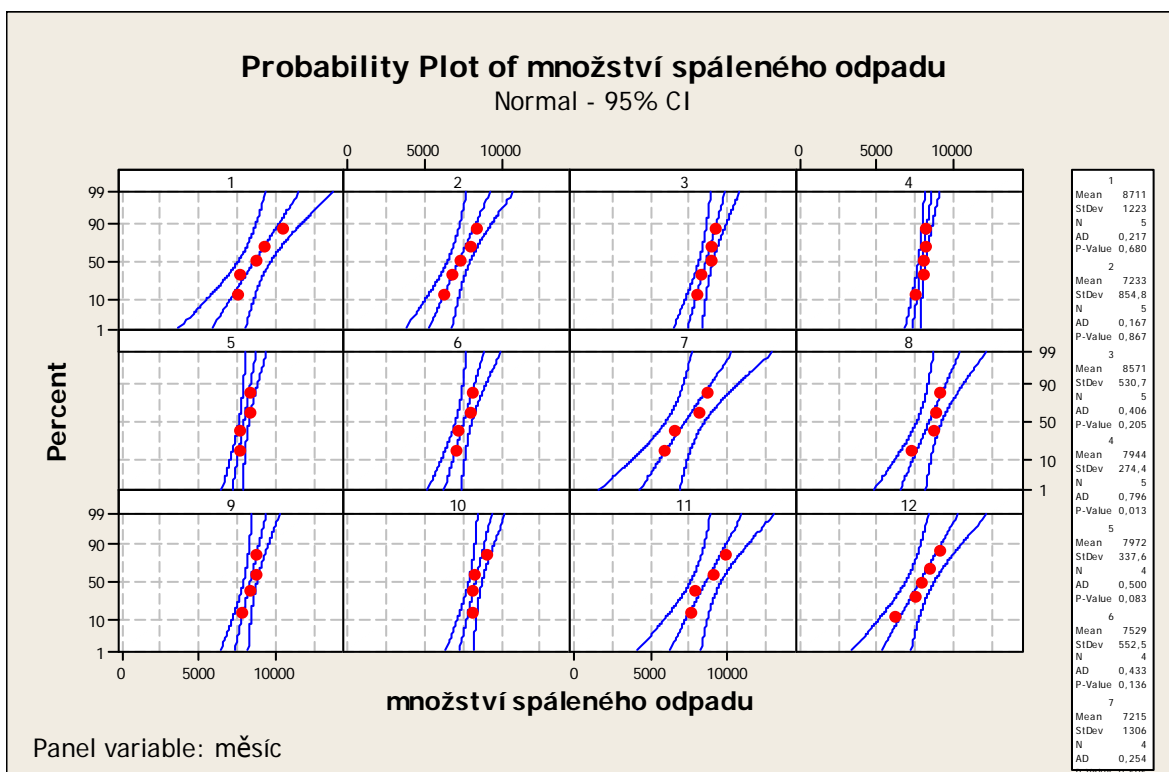
Testovaná hypotéza H_0 tedy tvrdí, že střední hodnota dostupného množství odpadu nezávisí na měsíci.

Hladina významnosti byla volena obvyklých 5%

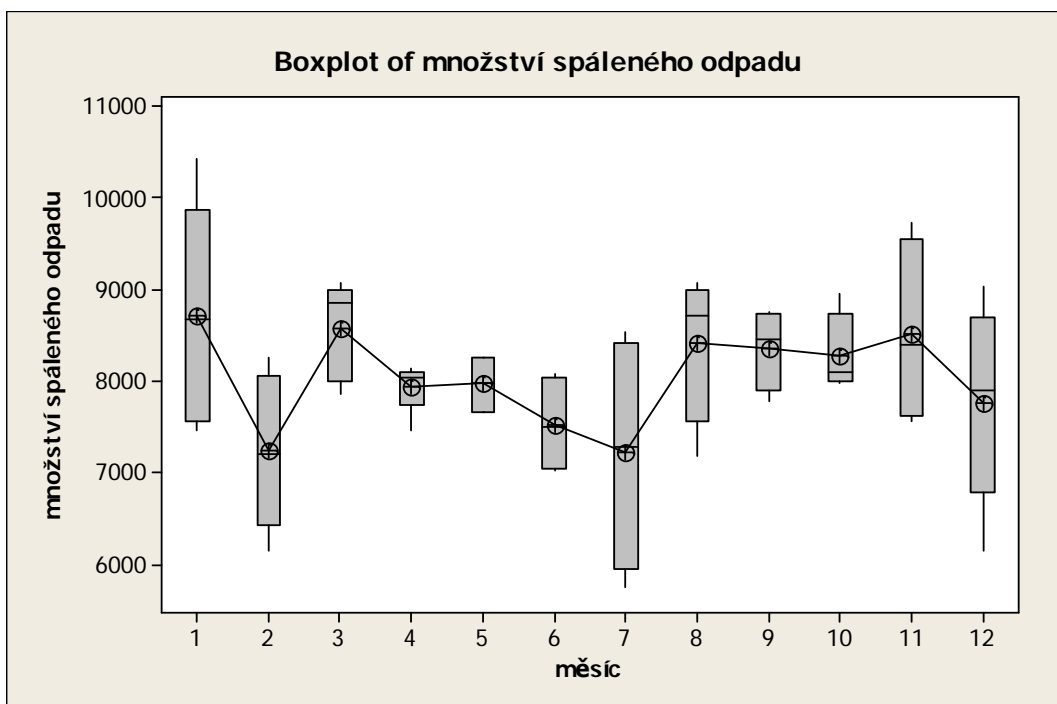
Z vizuálního posouzení grafů v *obr. 16* je zřejmé, že data pocházejí z normálního rozdělení (body nevykazující nápadný nelineární trend).

Zároveň byl proveden test na shodu rozptylů, pro který se použil Levenův test. Výsledná p-hodnota 0,07 potvrdila shodu rozptylů, čímž byly splněny předpoklady o datech pro analýzu rozptylu.

Výsledná p-hodnota pro samotnou analýzu rozptylu je 0,19 a hypotéza H_0 se tedy nezamítá. Dostupnost odpadu tedy není závislá na ročním období.



Obr. 16 Normální pravděpodobnostní grafy množství spáleného odpadu [t]



Obr. 17 Krabicový graf množství spáleného odpadu [t]

Při konfrontaci výsledků testu (a to ve formě početní i grafické) a informací získaných přímo ve spalovně Termizo se došlo k závěru, že ačkoli jsou rozdíly v dodávkách odpadu dle ANOVY statisticky nevýznamné, spalovna určité difference pociťuje. Jak je patrné z krabicového grafu (*obr. 17*), v teplých měsících odpadů ubývá (lidé např. odjíždějí na dovolené). Nejnižší hodnoty průměrného množství zpracovaného odpadu má tedy červenec (únor také, avšak tento jev je ovlivněn nižším počtem dnů v měsíci). V zimním období se zase naopak dováží i popel, který lidé vyhazují ze svých kotlů společně s ostatním odpadem (to bývá jednou z možných příčin vzniku požáru v bunkru odpadu). Nejvyšší průměry v množství zpracovaného odpadu tak vykazuje leden.

Dále jsou z grafu zřejmé velké variability pro měsíce leden a červenec, naopak malé pro duben a květen.

4.3 Výhřevnost odpadu

Způsob vzniku komunálního odpadu podmiňuje skutečnost, že výhřevnost směsného odpadu je veličinou proměnnou, jejíž hodnota je závislá na řadě faktorů, mezi které patří i klimatické podmínky.

Pro orientační stanovení výhřevnosti zpracovávaného odpadu je možné využít **Reimannův vztah** (13) [7], který je použitelný v případě, že teplo vzniklých spalín je využito pro výrobu páry v utilizačním kotli, který následuje bezprostředně za spalovací částí. Pokud je do bloku spalování přiváděno i přídavné palivo, je nutné tuto skutečnost zohlednit a vztah (13) musí být korigován o položku zohledňující podíl přídavného paliva na celkové výrobě páry [8].

$$LHV = 1,133 \cdot \frac{m_{st,w}}{m_w} \cdot i_{st\ hp\ net} + 0,008 \cdot T_b - 0,801 \quad (13)$$

kde:

LHV	výhřevnost odpadu	[GJ/t]
$m_{st,w}$	množství vyrobené páry z odpadu bez podílu páry vyrobené z importované energie	[t/rok]
m_w	množství zpracovaného odpadu	[t/rok]
T_b	teplota spalín na výstupu z kotle	[°C]
$i_{st\ hp\ net}$	zvýšení entalpie páry	[GJ/t]

Zvýšení entalpie páry v bloku výroby páry je dáno rozdílem entalpie vyrobené páry a entalpie napájecí vody, který je znázorněn ve vztahu (14) [7].

$$i_{st\ hp\ net} = i_{st\ hp} - i_{nap} \quad (14)$$

kde:

$i_{st\ hp}$	Měrná entalpie vyrobené páry	[GJ/t]
i_{nap}	Měrná entalpie napájecí vody	[GJ/t]

Dle zmíněného vztahu pro výpočet výhřevnosti (13) byly na základě zaznamenaných dat v provozním deníku (spálené množství odpadu a vyrobená pára) vypočítány výhřevnosti odpadu v půldenních frekvencích (použití při matematickém modelování situace).

Hodnoty průměrných měsíčních výhřevností v jednotlivých letech (*tab. 11*) slouží k okamžité orientaci. Hned na první pohled je tak patrné, že se zařízení nemusí zabývat problémem podmínky minimální výhřevnosti KO pro spalování bez použití podpůrného paliva, která je **3,6 MJ/kg** [8].

Z průměrných hodnot v jednotlivých letech je patrná vzrůstající výhřevnost KO. Přitom hodnoty přesahující 11 MJ/kg se už nebezpečně přibližují horní hranici výhřevnosti 12 MJ/kg, pro kterou je zařízení projektované.

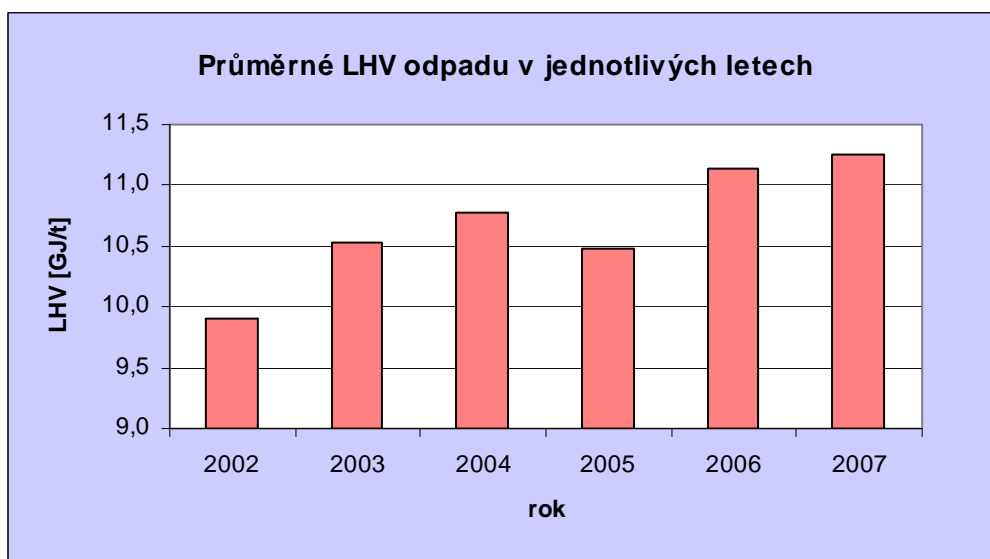
Rozdílná hodnota LHV v jednotlivých měsících zase poukazuje na fakt, že výhřevnost odpadu je závislá i na ročním období. Jestli je to závislost statisticky významná či nikoli, bude zjištěno analýzou rozptylu.

Pro lepší znázornění zmíněných závěrů jsou průměry z *tab. 11* znázorněny v grafické podobě (*obr. 18* a *obr. 19*).

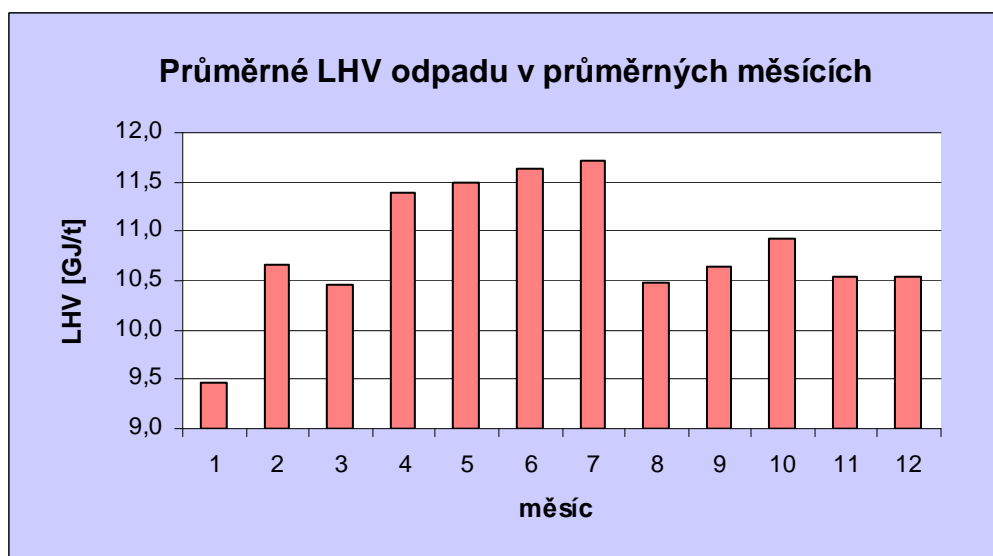
Tab. 11 Průměrné výhřevnosti odpadu v jednotlivých měsících a letech

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	průměr
leden		8,65	9,65	9,82	8,62	10,57	9,46
únor		10,43	10,77	10,10	10,72	11,28	10,66
březen		10,03	10,75	10,33	9,33	11,90	10,47
duben		10,53	10,81	11,71	12,21	11,74	11,40
květen		10,35		11,19	11,72	12,19	11,36
červen		11,35		11,18	12,21	11,80	11,63
červenec		11,11		10,68	15,17 ⁸	9,87	11,71
srpen		11,02		9,79	10,50	10,57	10,47
září		10,90		9,93	10,34	11,42	10,65
říjen		10,80	11,30	10,10	11,50		10,93
listopad		10,38	11,36	10,40	10,01		10,54
prosinec	9,90	10,77	10,80	9,97	11,24		10,54
průměr	9,90	10,53	10,78	11,38	11,13	11,26	

⁸ LHV značně převyšuje obvyklé hodnoty (jde o odlehlou hodnotu) a to i maximální, pro kterou je spalovna navržena. Jelikož v deníku nebyla tato abnormalita nijak vysvětlena (nadprůměrná výhřevnost dávek odpadů), nebude tento údaj při analýze rozptylu uvažován.



Obr. 18 Trend vývoje průměrné výhřevnosti směsného komunálního odpadu



Obr. 19 Průměrné měsíční výhřevnosti spalovaného odpadu pro průměrný měsíc

4.3.1 Rozbor dat

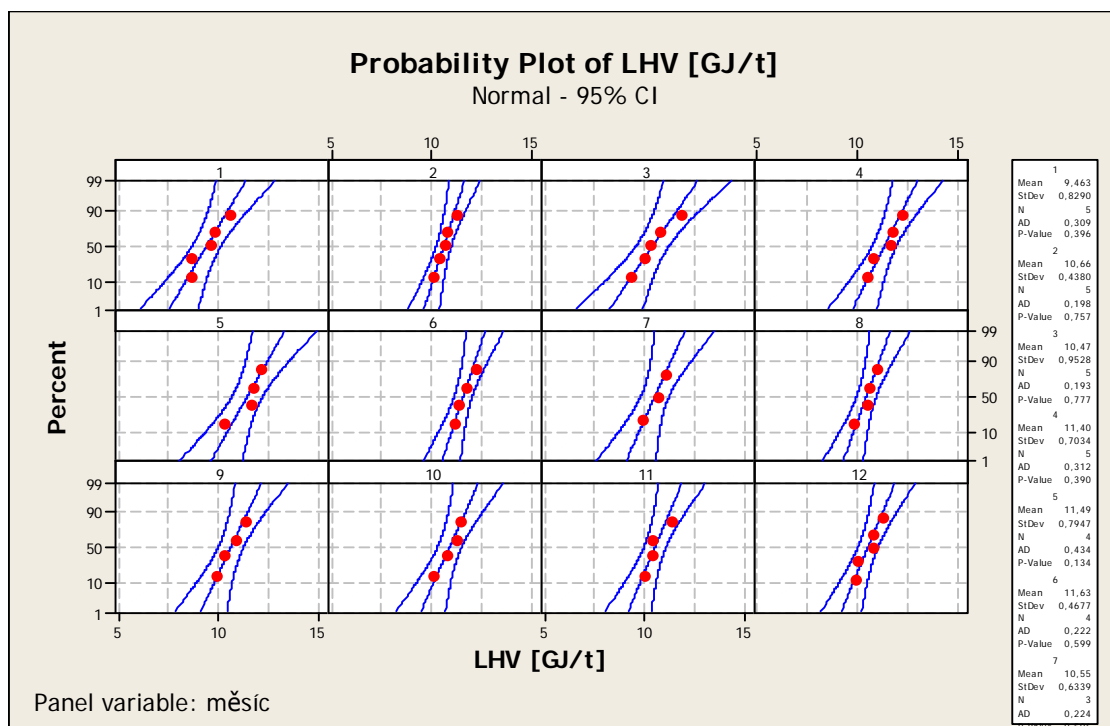
K analýze rozptylu byl opět použit statistický software MINITAB, s jehož pomocí se stanovila závislost výhřevnosti spalovaného odpadu na měsíci v roce. Na základě rozboru se pak určovalo, zda je nutné plánovat provoz na jednotlivé měsíce zvlášť, anebo stačí-li vypracovat pouze jeden plán použitelný pro všechny měsíce.

Testovala se hypotéza H_0 , která tvrdila, že LHV je závislá na měsíci v roce.

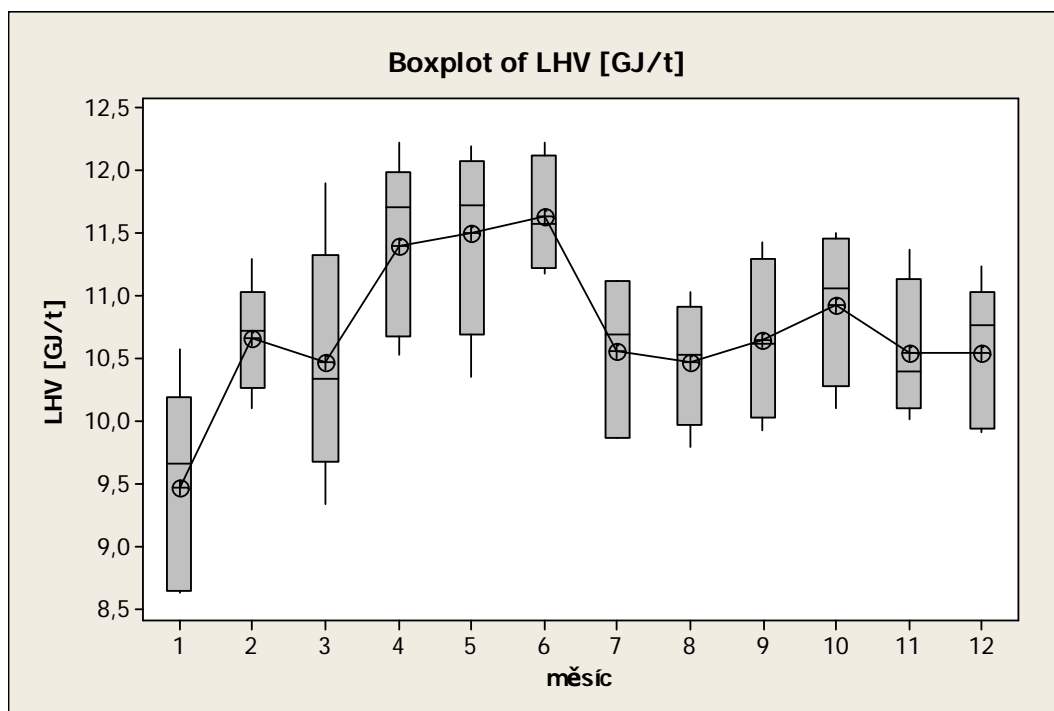
Hladina významnosti byla volena 5 %.

I v tomto případě body nevykazovaly nápadný nelineární trend (*obr. 20*) a data opět pocházely z normálního rozdělení. Výsledná p-hodnota 0,982 (Levenův test) shodu rozptylů potvrdila. Předpoklady o datech pro analýzu rozptylu byly splněny.

Výsledná p-hodnota pro samotnou analýzu rozptylu je 0,692 a hypotéza H_0 se tudíž zamítá. Byl prokázán vliv měsíce v roce na výhřevnost odpadu.



Obr. 20 Normální pravděpodobnostní grafy výhřevnosti spáleného odpadu

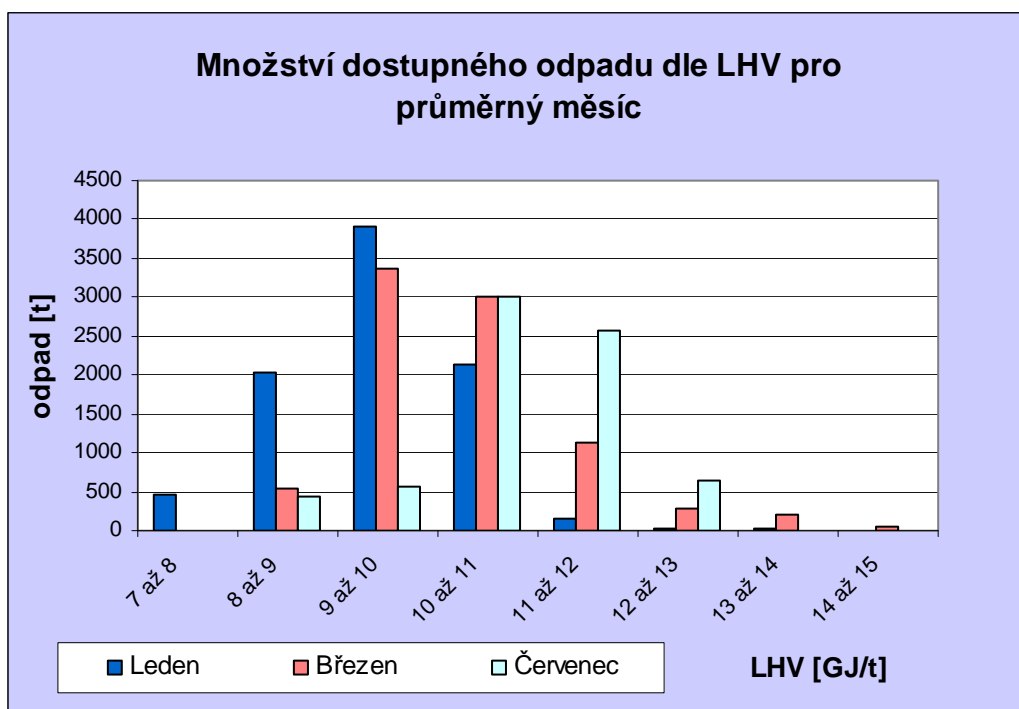


Obr. 21 Krabicový graf výhřevnosti spáleného odpadu

V tomto případě je odlišnost dat lépe viditelná (obr. 21). Teorie o nízkých výhřevnostech odpadů v zimním období zapříčiněné většinou velkým množstvím balastních komponent (např. popel) a o vysoké LHV odpadů v teplých měsících, kdy lidé vyhazují více vysoce výhřevných odpadů (např. vyšší obsah obalových materiálů), byly správné. Nejvíc přitom vybočuje leden s nízkým energetickým potenciálem odpadu a naopak duben, květen a červen s vysokou hodnotou LHV (výsledek Tukeyova testu). Variabilita dat je u všech měsíců velmi podobná (obr. 21).

To vše podporuje fakt, že v průběhu roku je spalovna schopna vyrábět prakticky stejné množství páry. Jelikož je však poptávka po teple v létě mnohem nižší, je řešením začlenit do provozu již zmiňovanou kondenzační turbínu. Zájem o elektrickou energii je totiž v průběhu roku trvalý (elektřina je nedostatkovým zbožím).

Pro porovnání plánů provozu za různých podmínek byly vybrány měsíce s rozdílnými hodnotami jak výhřevnosti, tak množství dostupného odpadu. Bylo vhodné vybrat z uvedených měsíců ty, které byly něčím význačné. Vybrán byl leden (maximální hodnota spáleného odpadu a nejnižší výhřevnost odpadu), červenec (nejméně odpadu a vyšší LHV) a březen jako zástupce průměrného měsíce. Na obr. 22 je rozdílnost těchto měsíců zřetelná.



Obr. 22 Množství dostupného odpadu v závislosti na výhřevnosti pro průměrný měsíc

4.4 Regresní analýza

Další částí analýzy dat je regresní analýza, pomocí které se získá vyjádření vybraných funkčních závislostí. Tyto závislosti jsou nezbytné při tvorbě účelové funkce v matematickém modelu.

Cílem tedy bylo nalezení parametrů příslušných regresních funkcí vyjadřující vztahy:

- dávkovaný odpad – vyrobená pára,
- vyrobená pára – vyrobené teplo,
- vyrobená pára – vyrobená elektřina.

Při regresní analýze lze k aproximaci zadaných hodnot použít *metodu nejmenších čtverců*.

Metoda nejmenších čtverců (15) [12] je matematická metoda, určená ke statistickému zpracování dat. Umožňuje nalézt vhodnou aproximační funkci pro dané empiricky zjištěné hodnoty. Daný je přitom parametrizovaný analytický předpis pro hledanou funkci a hledají se hodnoty těchto parametrů.

Tato metoda hledá takovou funkci, kde je součet čtverců odchylek jejích funkčních hodnot od daných naměřených hodnot co nejmenší. Minimalizuje se tedy tzv. reziduální součet čtverců:

$$S_e^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (15)$$

Kde:

Y_i ... naměřené hodnoty,

\hat{Y}_i ... funkční hodnoty.

Za odhadnutou hodnotu \hat{Y} se dosadí konkrétní tvar regresní křivky, poté se výraz parciálně zderivuje podle jednotlivých parametrů (hledáme minimum) a položí roven nule. Tím je obdržena soustava rovnic, jejímž řešením jsou konkrétní hodnoty parametrů [12].

Hodnoty parametrů pro tuto práci byly získány pomocí softwaru Maple.

Dávkovaný odpad – vyrobená pára:

Bylo nutné získat regresivní křivku ve tvaru $f(x) = ax$ tak, aby platilo, že pokud se nespálí žádný odpad, nebude vyrobená žádná pára. V případě běžně užívaného tvaru $f(x) = ax + b$ by toto splněno nebylo.

Odpad byl z důvodu větší přesnosti rozdělen podle intervalů LHV. Pro výhřevnost byly stanoveny intervaly: 7-8 GJ/t, 8-9 GJ/t, 9-10 GJ/t, 10-11 GJ/t, 11-12 GJ/t, 12-13 GJ/t, 13-14 GJ/t. Pro každý interval byla zjištěna funkční závislost množství vyrobené páry na množství dávkovaného odpadu. Všechny uvedené funkce mají lineární charakter. Pro ilustraci je uvedena regresní křivka pro data z intervalu LHV 10-11 GJ/t (obr. 23).

K volbě zmíněného postupu vedla snaha o větší korektnost výstupů. Pro porovnání je uveden graf závislosti dávkovaný odpad – vyrobená pára bez dělení na intervaly LHV (obr. 24), jehož hodnota spolehlivosti je mnohem menší.

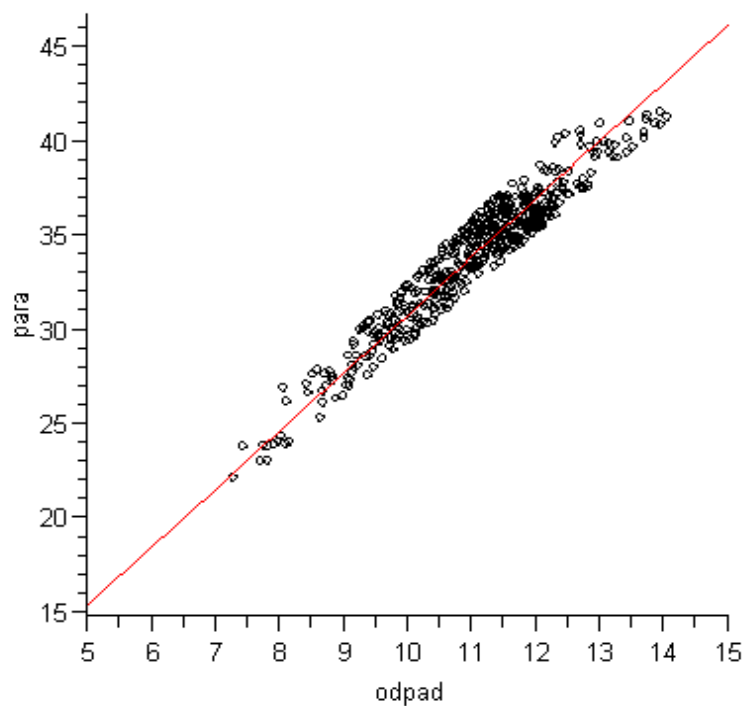
Hodnoty získaných koeficientů jsou uvedeny v tab. 12.

Znázorněná funkce je ve tvaru:

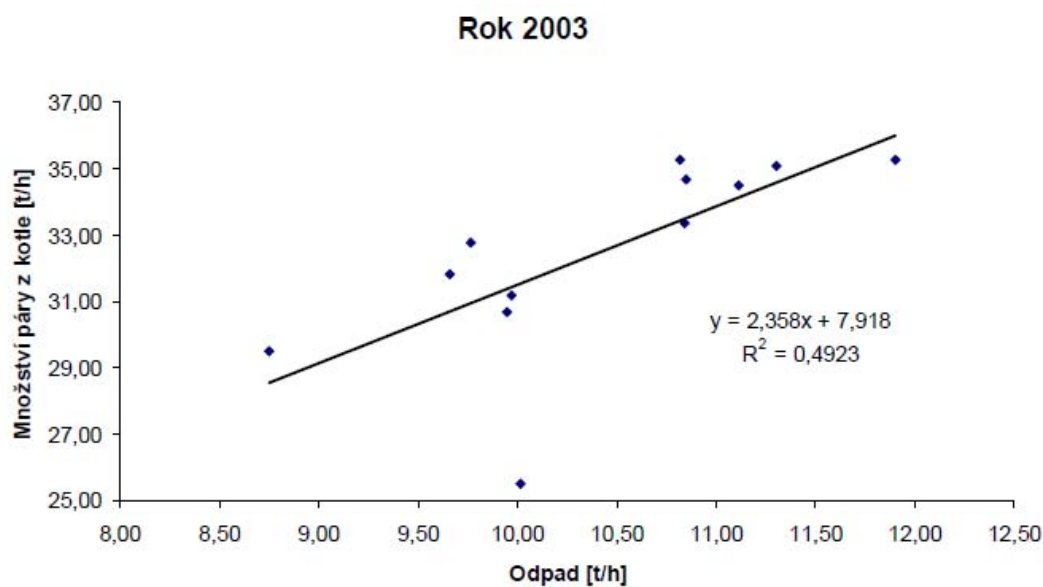
$$f(x) = 3,080088504x$$

Spolehlivost funkce (index determinace):

$$R^2 = 0,9110594913$$



Obr. 23 Závislost vyrobené páry [t/h] na množství spáleného odpadu [t/h] v intervalu LHV 10-11 GJ/t



Obr. 24 Množství vyrobené páry v kotli na množství spáleného odpadu – průměrné hodnoty za rok 2003 [3]

Tab. 12 Hodnoty hledaných parametrů funkcí

LHV [GJ/t]	7 až 8	8 až 9	9 až 10	10 až 11	11 až 12	12 až 13	13 až 14	14 až 15
a	2,1974	2,5138	2,7780	3,0801	3,3977	3,7072	3,9797	4,3647

Vyrobená pára – exportované teplo:

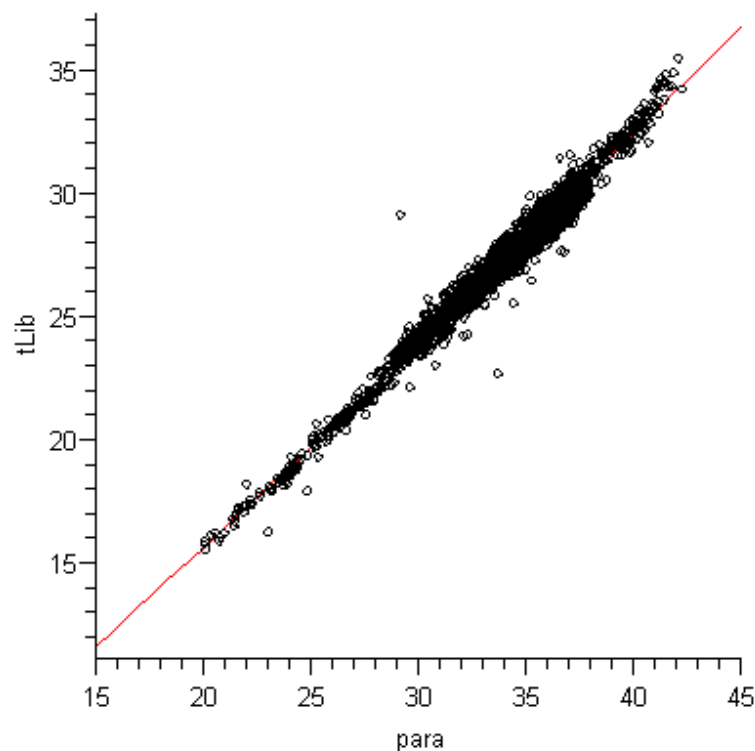
Hledá se závislost ve tvaru $f(x) = ax^2 + bx$. I přesto, že se závislost jeví jako lineární, v úseku vyšší produkce páry, jak graf (obr. 25) nepatrně naznačuje, by mohlo k nelinearitě dojít a podle vizuálního posouzení tento tvar lépe vystihuje danou závislost než tvar $f(x) = ax$. V případě zvýšeného výkonu kotle by se charakter funkce mohl změnit.

Hledaná funkce:

$$f(x) = 0,001356706958x^2 + 0,7570660408x$$

Spolehlivost funkce:

$$R^2 = 0,9770490344$$


Obr. 25 Závislost exportované páry [t/h] na vyrobené páře [t/h]

Vyrobená pára – exportovaná elektřina:

Jak je z *obr. 26* patrné, závislost je nelineárního charakteru, proto se volí tvar $f(x) = ax^2 + bx$.

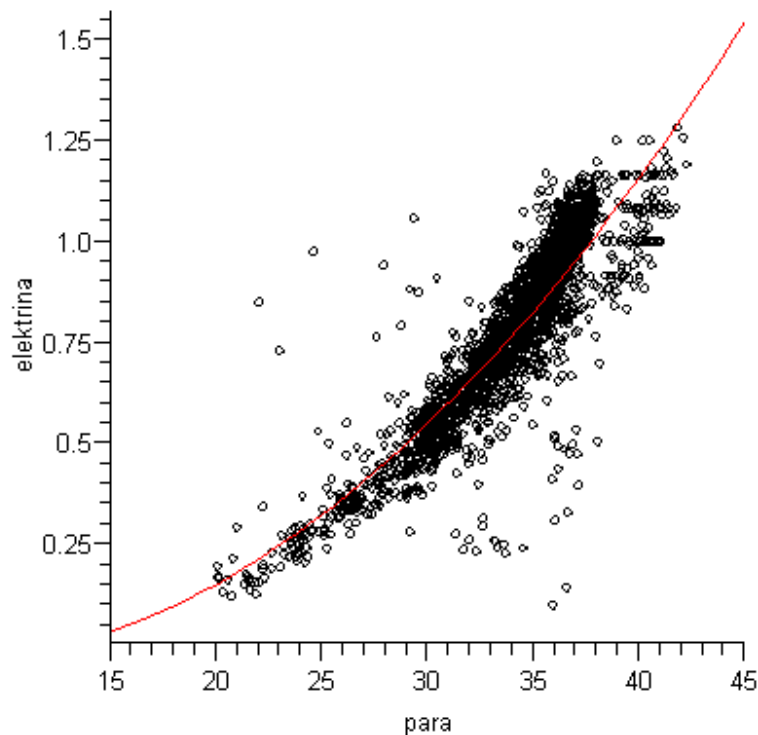
Ve srovnání s předchozí závislostí je zde vidět silnější nelinearita, což bude mít význam při návrhu optimalizačního plánu. Elektřiny se totiž exportuje více z jedné větší dodávky páry, než z několika menších, i když celková hodnota dodané páry bude stejná.

Hledaná funkce:

$$f(x) = 0,001069211870x^2 - 0,01379218325x$$

Spolehlivost funkce:

$$R^2 = 0,7684162485$$



Obr. 26 Závislost exportované elektřiny [MW] na vyrobené páře [t/h]

5 Matematický model pro vyčíslení příjmů jednotky EVO

Celkový zisk spalovny je složen z několika částí. Zařízení v první řadě plní svoji primární funkci likvidaci odpadů, za kterou od státu dostává dotaci (vztaženou na množství zneškodněného odpadu). Další částí zisku jsou peníze z prodeje energie. Tato energie se člení na tepelnou a elektrickou. Obě jsou odváděny do sousedící teplárny ve formě páry a elektřiny. Díky společné výrobě tepla a elektřiny je spalovna kvalifikována jako kogenerační zařízení, tudíž poslední část zisku tvoří dotace za kogenerační výrobu.

Cílem bylo najít funkci vyčíslicí zisk spalovny za určité období, jejíž vstupní proměnné by byly hodinové dávky odpadu s určitou výhřevností, tedy funkci

$$z=f(\mathbf{m})$$

$$\text{kde } \mathbf{m} = \begin{pmatrix} m_{1,1} & \cdots & m_{1,l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{k,1} & \cdots & m_{k,l} \end{pmatrix}, k \text{ je počet intervalů LHV a } l \text{ je počet dnů.}$$

Tedy $m_{i,j}$ značí dávku odpadu z i -tého intervalu LHV v j -tém dni.

Vyrobená pára $s=f(m)$:

Pro výrobu páry byly použity vztahy získané v části regresní analýza. Pára vyrobená ze spálení odpadu z i -tého intervalu LHV v j -tém dni, pak bude dána vztahem:

$$s_{i,j} = a_i \cdot m_{i,j} \quad (16)$$

kde a_i je parametr regresní funkce vypočítaný v části regresní analýzy (tab. 12).

Tepelná energie $t=f(s)$:

I pro výrobu tepla byl použit vztah získaný v části regresní analýza. Produkované teplo z vyrobené páry je proto vyjádřeno jako:

$$t_{i,j} = b_1 \cdot s_{i,j}^2 + b_2 \cdot s_{i,j}, \quad (17)$$

kde $s_{i,j}$ je dáno vztahem (16)

$$b_1 = 0,001356706958$$

$$b_2 = 0,7570660408$$

Elektrická energie $e=f(s)$:

I zde jsou využity výsledky regresní analýzy. Množství exportované elektřiny je vyjádřeno takto:

$$e_{i,j} = c_1 \cdot s_{i,j}^2 + c_2 \cdot s_{i,j} \quad (18)$$

kde $s_{i,j}$ je dáno vztahem (16)

$$c_1 = 0,00106921187$$

$$c_2 = -0,01379218325$$

Dotace za kogeneraci:

Pokud dle vyhlášky č.439/2005 Sb. [19] provozovna splňuje danou normu, má nárok na příspěvek k ceně elektřiny vyrobené z kombinované výroby elektřiny a tepla. Termizo uplatňuje nárok na dotaci ve vysokém tarifu v délce 8 hodin denně [20].

Vztahy pro výpočet způsobu účtování úspory primární energie v procesu kombinované výroby elektřiny a tepla a stanovení minimální účinnosti užití energie při výrobě elektřiny a tepla jsou pouze ilustrativní. Výpočet je přímo v optimalizačním programu.

Vztah pro výpočet úspor primární energie (19) [19]:

$$UPE = \left[1 - \frac{1}{\frac{\eta_q^T}{\eta_r^V} + \frac{\eta_e^T}{\eta_r^E}} \right] \cdot 100 [\%] \quad (19)$$

Dílčí vztahy pro výpočet účinnosti výroby tepla η_q^T (20) a elektřiny η_e^T (21) [19]:

$$\eta_q^T = \frac{Q_{už}^T}{Q_{pal}^T} [-] \quad (20)$$

$$\eta_e^T = \frac{E^T}{Q_{pal}^T} [-] \quad (21)$$

Kde:

η_q^T ... energetická účinnost dodávky tepla z kombinované výroby definována jako roční nebo měsíční výroba užitečného tepla v soustrojí nebo výrobny s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla dělená spotřebou paliva použitého v tomto soustrojí nebo výrobě.
U parních výroben elektřiny a tepla (*což pro případ spalovny Termizo platí*) se tato hodnota vynásobí koeficientem 1,045 [-] [19].

η_e^T ... elektrická účinnost kombinované výroby definována jako roční nebo měsíční výroba elektřiny dělená spotřebou paliva použitého v soustrojí nebo výrobě s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla.
U parních výroben elektřiny a tepla, kde je rok výstavby 1996 a dříve (*opět platí*), se Tato hodnota vynásobí koeficientem 1,107 [-] [19].

η_r^V ... referenční hodnota energické účinnosti oddělené výroby tepla (výtopenská výroba) [-] (tabulková hodnota).

η_r^E ... referenční hodnota účinnosti oddělené výroby elektřiny [-] (tabulková hodnota).

$Q_{už}^T$... roční nebo měsíční výroba užitečného tepla dodaného ze soustrojí nebo výroby s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla, které je využíváno ke sdílení a předání tepla bez následné transformace [MWh].

Q_{pal}^T ... celkový energetický potenciál paliva použitého ke společné výrobě užitečného tepla a elektřiny [MWh].

E^T ... roční nebo měsíční výroba svorkové elektřiny ze soustrojí nebo výroby s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla [MWh].

Vztah pro stanovení účinnosti výroby elektřiny v parním turbosoustrojí (22)[21]:

$$\eta_{el} = \frac{3,6 \cdot E^T \cdot 100}{Q_{pal}^E} = \frac{3,6 \cdot E^T \cdot 100}{Q_{el}} \cdot \frac{Q_{el} + Q_{rep}}{Q_{pal}} \quad [\%] \quad (22)$$

Kde:

Q_{el} ... tepelná energie v páře, spotřebovaná k výrobě elektřiny v parních turbosoustrojích [GJ].

Q_{pal} ... energie paliva spotřebovaného v kotlích ke krytí výroby elektřiny a tepla [GJ].

Q_{pal}^E ... energie paliva spotřebovaného v kotlích připadajícího na výrobu elektřiny [GJ].

Pokud EVO splňuje podmínky: $UPE \geq 10\%$ a $\eta_{el} \geq 49\%$, má nárok na dotace za kogeneraci.

Pomocí výše uvedených vztahů byla vytvořena **účelová funkce** představující zisk spalovny za určité období ve tvaru:

$$z = \begin{cases} \sum_i \sum_j \left((z_o \cdot m_{i,j} + z_p \cdot t(m_{i,j}) + z_e \cdot e(m_{i,j})) \cdot 24 + z_d \cdot t_{vt} \cdot e(m_{i,j}) \right) & \text{pro } UPE \geq 10\%, \eta_{el} \geq 49\% \\ \sum_i \sum_j \left((z_o \cdot m_{i,j} + z_p \cdot t(m_{i,j}) + z_e \cdot e(m_{i,j})) \cdot 24 \right) & \text{jinak} \end{cases}$$

Omezení:

- dostupnost odpadu dané výhřevnosti $\sum_j m_{i,j} \leq m_{celk\ i}, \forall i = 1, \dots, k$,
- maximální množství vyrobené páry $\sum_i (s(m_{i,j})) \leq s_{max}, \forall j = 1, \dots, l$.

Kde:

$s(m_{i,j})$ je dáno vztahem (16),

$$s(m_{i,j}) = a_i \cdot m_{i,j},$$

$t(m_{i,j})$ je dáno vztahy (16) a (17):

$$t(m_{i,j}) = b_1 \cdot (a_i \cdot m_{i,j})^2 + b_2 (a_i \cdot m_{i,j}),$$

$e(m_{i,j})$ je dáno vztahy (16) a (18):

$$e(m_{i,j}) = c_1 \cdot (a_i \cdot m_{i,j})^2 + c_2 (a_i \cdot m_{i,j}).$$

i ... interval LHV,

j ... den,

$m_{i,j}$... množství dávkovaného odpadu ve dni j s výhřevností z intervalu i [t/h],

$m_{celk\ i}$... dostupné množství odpadu s výhřevností intervalu i v daném období [t/h],

z_0 ... příjem za tunu spáleného odpadu [Kč/t],

z_e ... zisk z prodeje GWh elektřiny [Kč/GWh],

z_p ... zisk z prodeje tuny páry [Kč/t],

z_d ... dotace za kogenerační výrobu [Kč/MWh],

t_{vt} ... doba, po kterou je uplatňován vysoký tarif [h]

s_{max} ... maximální množství vyrobené páry do překročení kapacity kotle

$$s_{max} = 41 \text{ [t/h] [22]}$$

Tab. 13 Údaje potřebné pro výpočet účelové funkce

Cena za spálený odpad z_0	[Kč/t]	800
Zisk z prodeje GWh elektřiny z_e	[Kč/GWh]	990
Zisk z prodeje páry z_p	[Kč/t]	460
Dotace za kogenerační výrobu z_d	[Kč/MWh]	1 310
Doba uplatňování vysokého tarifu t_{vt}	[h]	8
Maximální množství vyrobené páry do překročení kapacity kotle s_{max}	[t/h]	41

V předešlých obdobích byly do modelu optimalizace zahrnuty také sankce za nesplnění nasmlouvaného množství dodávané energie. V současné době však spalovna po dohodě s teplárnou nemusí dané limity dodržovat, podmínkou pouze zůstává minimální denní dodávka energie (netýká se nahlášených odstávek). Do popředí se tak dostávají dotace, které zařízení dostává při splnění zákonem daných norem.

Ukazatel UPE a η jsou při současných podmínkách splněny vždy. Při optimalizaci začnou mít význam až v době zapojení kondenzační turbíny. Pokud totiž spalovna v letních měsících při přebytku páry, po které nebude poptávka, přejde na režim pouze s kondenzační turbínou, tak o dotaci přijde.

6 Optimalizace provozu

Z matematického hlediska je optimalizace snahou o nalezení takových hodnot proměnných, pro které daná účelová funkce nabývá minimální nebo maximální hodnoty.

V případě této práce bylo cílem nalézt optimální plán dávkování odpadu tak, aby bylo dosaženo maximálního zisku. Účelová funkce zahrnovala výnosy ze zneškodněného odpadu, vyrobeného tepla a elektřiny. Při společné výrobě těchto dvou energií a splnění stanovených podmínek bylo počítáno ještě s dotací z kogenerace.

Vliv na výsledek měla nelineární závislost funkce pro výpočet zisku z exportované elektřiny. Při produkci většího množství páry najednou se tak dá očekávat vyšší množství získané energie, než pokud se dané množství páry rozdělí na dílčí části.

Výpočet optimalizace (nelineární) byl proveden v profesionálním vývojovém prostředí GAMS⁹. Původní plán, kdy měl být zadaný problém řešen v programu Maplesoft Maple, musel být změněn z důvodů přílišné rozsáhlosti úlohy, kterou už systém Maple nedokázal řešit.

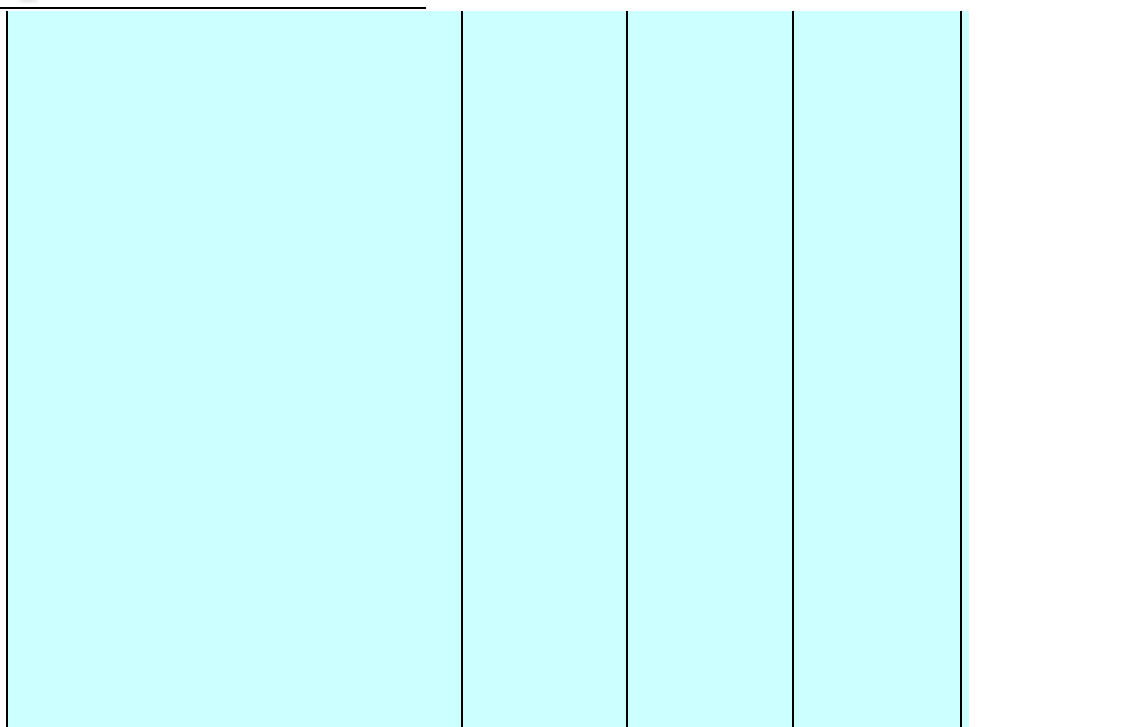
Pro vybrané měsíce (leden, březen a červenec) byl vypočítán plán dávkování odpadu a výroby páry s maximálním finančním ziskem. Pro porovnání byl také vytvořen plán s minimálním finančním ziskem při stejném množství zpracovaného odpadu.

Nelze předpokládat, že by se provoz spalovny s přihlédnutím ke zkušenostem obsluhy v praxi nevědomě držel plánu s minimálním ziskem. Srovnání těchto extrémů však poslouží jako dobrá ukázka možných ztrát při nevhodné strategii provozu.

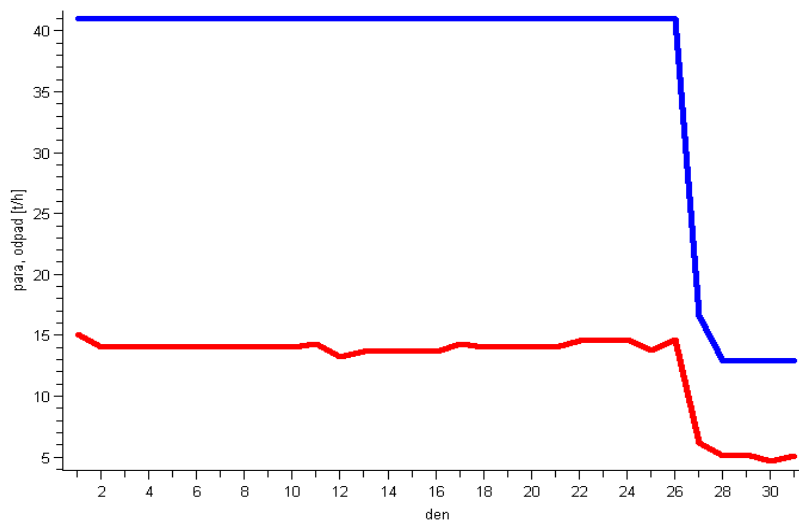
6.1 Výsledky optimalizace

	Jednotka	Leden	Březen	Červenec
Maximum		<i>obr. 27</i>	<i>obr. 29</i>	<i>obr. 31</i>
Množství vyrobené páry	[t]	27 221,729	25 281,416	27 403,806
Množství exportované páry	[t]	22 062,445	20 449,682	22 210,385
Množství vyrobené elektřiny	[MW]	1 654,597	1 491,611	1 669,892
Množství exportované elektřiny	[MW]	770,282	683,701	775,727
Zisk	[Kč/měsíc]	18 705 600	16 812 340	18 055 260
Minimum		<i>obr. 28</i>	<i>obr. 30</i>	

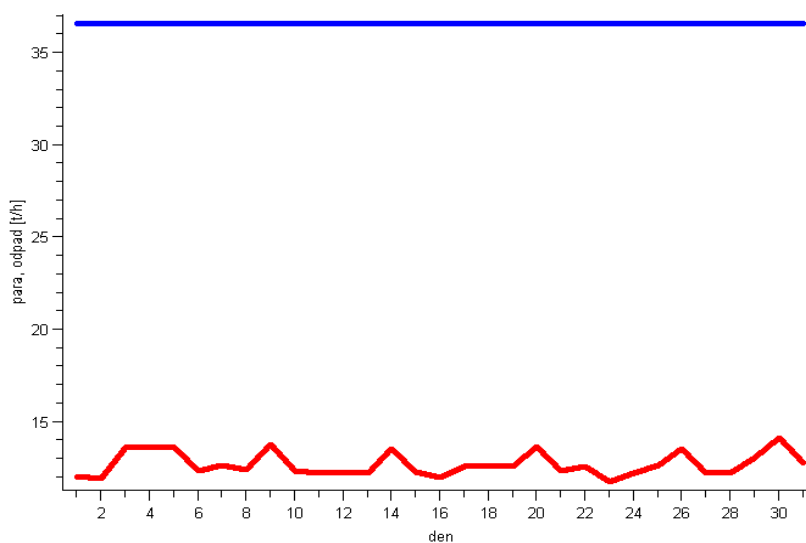
⁹ GAMS (The General Algebraic Modeling System) je program specificky navržený pro modelování lineární, nelineární a smíšené optimalizační problematiky. Systém je vhodný především při řešení rozsáhlých, komplikovaných úkolů.

				
obr. 32				
Množství vyrobené páry	[t]	27 221,729	25 281,416	27 403,806
Množství exportované páry	[t]	21 959,924	20 305,211	22 115,905
Množství vyrobené elektřiny	[MW]	1 654,597	1 491,611	1 654,597
Množství exportované elektřiny	[MW]	689,486	569,845	701,268
Zisk	[Kč/měsíc]	18 553 940	16 598 630	17 915 500
Rozdíl mezi max. a min. ziskem	[Kč]	151 660	213 710	139 760

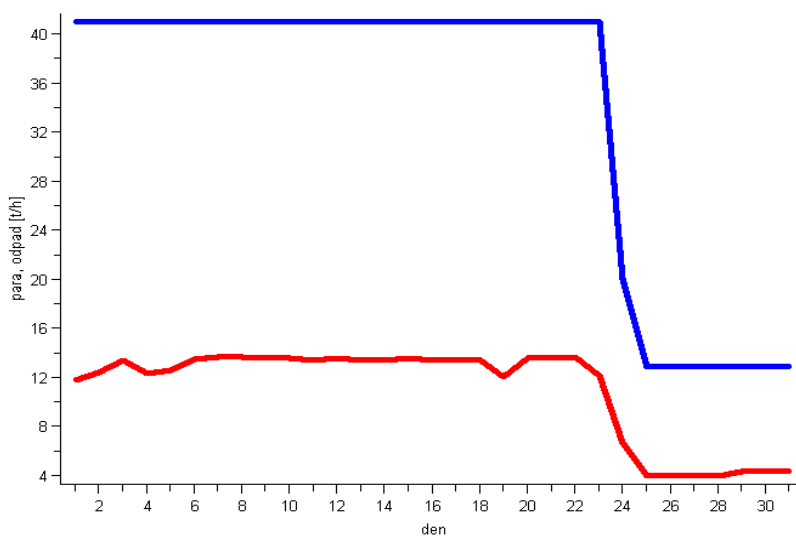
Pozn.: Modrá barva představuje vyrobenou páru, červená množství dávkovaného odpadu.



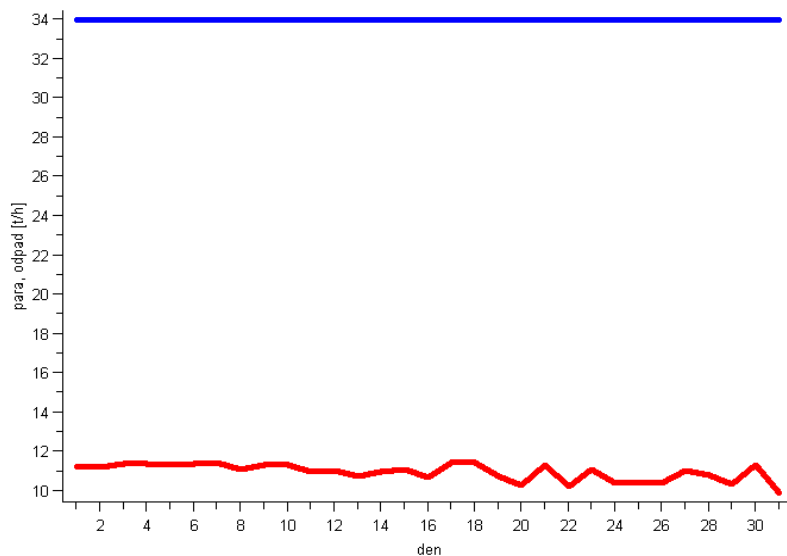
Obr. 27 Optimalizační plán s maximálním finančním efektem pro měsíc LEDEN



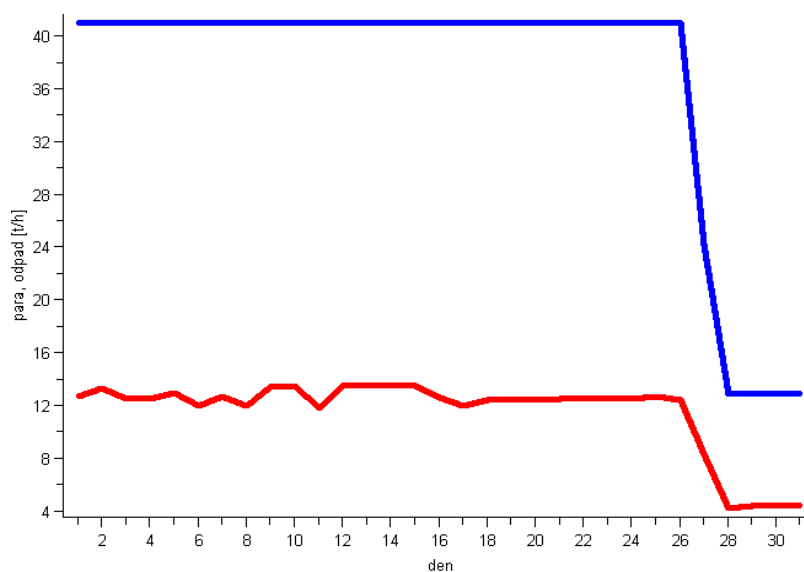
Obr. 28 Optimalizační plán s minimálním finančním efektem pro měsíc LEDEN



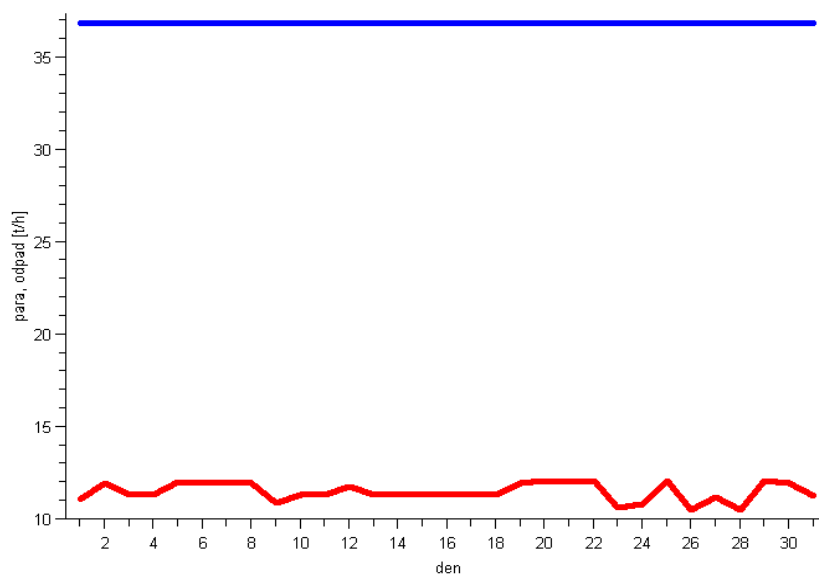
Obr. 29 Optimalizační plán s maximálním finančním efektem pro měsíc BŘEZEN



Obr. 30 Optimalizační plán s minimálním finančním efektem pro měsíc BŘEZEN



Obr. 31 Optimalizační plán s maximálním finančním efektem pro měsíc ČERVENEC



Obr. 32 Optimalizační plán s minimálním finančním efektem pro měsíc ČERVENEC

6.2 Zhodnocení výsledků optimalizace

Bylo potvrzeno, že pro stávající podmínky se optimalizace týká především závislosti vyrobené páry na exportované elektřině. Pokud se bude odpad dávkovat tak, aby spalovna pracovala pokud možno na maximální výkon kotle, bude množství vyrobené elektřiny nejvyšší. Jak je z grafů patrné, při nejvyšším zisku se chod kotle udržoval na maximu, pokles nastal až kvůli nedostatku odpadu. Je však nutné uvědomit si, že pro model bylo uvažováno určité množství dostupného odpadu na měsíc. V reálu je však odpad dovážen postupně (cca dvakrát do týdne), takže se nelze přesně řídit dávkovacím plánem, který software navrhnul. Další nepřesností je, že není možné přesně dodržovat dávkování odpadu s určitou výhřevností. Samozřejmě, že obsluha na základě zkušeností výhřevnost odpadu odhadne, ale odpad s danou LHV zrovna nemusí být k dispozici a zohlednit se musí také neustálé promíchávání, které vede k homogenizaci odpadu.

Závěrem provedené optimalizace je tedy zjištění, že v rámci možností aktuálního stavu je nejvýhodnější provoz na co možná nejvyšší výkon kotle i za cenu toho, že v určitých dnech výrazně poklesne výroba energií z důvodu nedostatku odpadu. Z výsledků optimalizace se dá také odhadnout, kolik dnů spalovna může pracovat na maximální výkon a v kolika dnech dojde k poklesu (a jakému) výroby energií. Za daných podmínek to je nejefektivnější řešení.

Tento fakt také potvrzuje současný stav ve spalovně Termizo, kde zatím jako nejvýhodnější vidí provoz s maximální produkcí páry a plným výkonem kotle.

Vytvořením tohoto matematického modelu byl dán základ pro optimalizaci provozu s kondenzační turbínou. V něm bude zapotřebí posoudit, vyplatí-li se spalovně v období nízké poptávky po páře zcela odstavit parní turbínu a vyrábět pouze elektřinu (která má vyšší cenový tarif a dosahovalo by se také vyšší účinnosti výroby elektřiny), nebo jestli zvolit kontinuální provoz obou turbín. Zde by už měly mnohem větší význam i dotace, které by už nebyly samozřejmostí.

Na tento problém bude potřeba nahlédnout i ze strany možnosti dané technologie. Nejenže se při provozu na maximální výkon mnohem více opotřebovává zařízení a do optimalizace by se tak měly zahrnout i výdaje na opravy či nákup nového zařízení, ale zároveň se i snižuje spolehlivost celé jednotky a tím klesá pravděpodobnost bezporuchového chodu.

Pokud se budou muset v důsledku nevhodného zatěžování kotle a následným opravám dělat neplánované odstávky, nejenže spalovna přijde o kapitál z nespáleného odpadu, ale také bude muset platit sankce teplárně za nesplnění minimální dodávky energie.

Všechny uvedené návrhy na rozvedení dané problematiky bude možné aplikovat na již vytvořený model, což značně usnadní budoucí optimalizace.

7 Závěr

V České republice se klade čím dál větší důraz na šetrnou cestu likvidace odpadů. Odpady a nakládání s nimi totiž v dnešní době představují významné environmentální problémy. Jejich tepelné zpracování tak může být považováno za možnou odpověď na ekologické hrozby v důsledku špatného či žádného nakládání s nimi. Nejlepší variantou by samozřejmě byla 100 % recyklace veškerých odpadů, ta ale v praxi není proveditelná. Společným cílem všech by tak mělo být nakládání s odpady odpovídající zásadám trvale udržitelného rozvoje. Tedy, aby nových odpadů vznikalo minimum a již existující odpady byly smysluplně využity, ať už jejich kompostováním, recyklací či energetickým využitím.

Při tepelném zpracování odpadů se díky uplatňování moderních emisních norem a používání nejmodernějších technologií pro kontrolu znečištění ovzduší snížily emise spaloven na minimální hodnoty. Díky tomu se jedná o účinnou a šetrnou metodu likvidace odpadů, které by jinak zatěžovaly životní prostředí. Pokud zařízení k jejich spalování ještě navíc uplatňuje politiku energetického využívání odpadů, zvyšuje tak i svůj příspěvek pro životní prostředí.

Snahou o zefektivnění využití energií se zabývala i tato práce. Jejím cílem bylo vyjádření vzájemných závislostí sledovaných parametrů (zpracovaný odpad, vyrobená pára, exportovaná energie apod.) v reálném zařízení jednotky EVO. Byla provedena analýza dat z provozního deníku (ANOVA), na jejíž základě se určila závislost dostupného odpadu na měsíci v roce. Následovala regresní analýza, pomocí které byla získána vyjádření vybraných funkčních závislostí. Tyto závislosti byly nezbytné pro vytvoření účelové funkce v matematickém modelu.

Byl tak vytvořen optimální plán dávkování odpadu a výroby páry, s kterým bylo dosaženo maximálního finančního zisku. Čili jinak řečeno, za uvedených podmínek byla maximálně využita energie z odpadů.

Pokud se vezmou v úvahu zadaná omezení pro vytvoření modelu, pak byl optimalizační výstup úspěšný. Tato problematika je však rozsáhlejšího charakteru a tato práce byla pouze prvním krokem při hledání ideálního řešení.

Jak již bylo zmíněno, bude v budoucnu nutné zaměřit se na dopad nepřetržitého provozu s co možná nejvyšším výkonem kotle na technické vybavení provozovny.

To, že je tato problematika opravdu aktuální dokazuje už fakt, že jsou ve spalovně prováděny různé druhy testů a hodnocení, např. kvality vyzdívky a její obnovy či poměrné spotřeby roštnic. Vedení spalovny si je vědomo nepříznivého dopadu takového provozu, nemá však dosud vypracovaný žádný optimalizační plán, který by se podobným problémem zabýval.

Budoucí optimalizace také bude muset zahrnout provoz kondenzační turbíny, která již bude v zařízení zapojena.

Seznam použité literatury

- [1] Wikipedie, Otevřená encyklopedie, Kjótský protokol, leden 2009 [online]. Dostupný z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kj%C3%B3tsk%C3%BD_protokol>
- [2] Termizo, 2004, leden 2009 [online]. Dostupný z:
<<http://www.termizo.cz>>.
- [3] Trhoňová L. *Technicko-ekonomická optimalizace provozu spalovny odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006, 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Urban.
- [4] Bébar L. Termické zpracování odpadů, přednáška pro studenty 1. ročníku II. stupně magisterského studia v předmětu Aplikovaná fyzikální chemie na Ústavu procesního a ekologického inženýrství (ÚPEI), Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2009.
- [5] Richter M. Technologie ochrany životního prostředí, Část II, Technologie ochrany ovzduší,, Univerzita J. E. Purkyně v Ústí n. L., Fakulta životního prostředí, Ústí nad Labem, 2004, str. 51-53.
- [6] Matoušek A. Výroba elektrické energie, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, Vysoké učení technické v Brně, 2007, s. 49-51, 58-65, ISBN 978-80-214-3317-5.
- [7] Hyžík J. Energetické využívání odpadu v Evropské unii a ve Švýcarsku, In Sborník příspěvků z mezinárodní konference Dny spalování 2004, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2.-3. června 2004, edit. P Slezák, VUT Brno, 2004, s. 144-155, ISBN 80-214-2650-0.
- [8] Cafourková T. *Posuzování energetického využití odpadů ve spalovnách komunálních odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, 19 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Urban.
- [9] Hyžík J. Ochrana ovzduší při energetickém využívání odpadů, Popis zařízení TVO Liberec, časopis Ochrana ovzduší 3-4/2002, 2002, str.44-48.
- [10] EnviWeb, zelená pro průmyslovou ekologii, Pár údajů ke spalovně v Liberci, 28. 2. 2009 [online]. Dostupný z:
http://www.enviweb.cz/?env=_archiv_hefbb&search=termizo
- [11] Budíková M. Statistika II, Distanční studijní opora, Masarykova univerzita, Ekonomicko-správní fakulta, Brno, 2006.
- [12] Pelikán Š. Statistické odhady, studijní opora pro základní kurz, Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, Přírodovědecká fakulta, 2003, projekt č. CZ.04.1.03/3.2.15.2/0230.

- [13] Bébar L., Pařízek T., Urban L., Stehlík P. Monitorování provozu spalovny komunálních odpadů s ohledem na škodlivé emise a funkci dioxinového filtru v roce 2005, Výzkumná zpráva VZ-EUREKA 2005/1, Brno, prosinec 2005, str.15-24.
- [14] Bébar L., Pařízek T., Stehlík P. Monitorování provozu spalovny komunálních odpadů s ohledem na škodlivé emise a funkci dioxinového filtru v roce 2007, Výzkumná zpráva VZ-EUREKA 2007/1, Brno, listopad 2007, str.11-17.
- [15] Bébar L., Pavlas M., Pařízek T., Urban L., Stehlík P. Podmínky efektivního energetického využívání odpadu , 54. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2007, 15.-18. října 2007, Srní, Šumava.
- [16] Reimann D. O. CEWEP Energy Report (Status 2001-2004). Result of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and Coefficients, Plant Efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Energy Results, Bamberg, Germany, Updated July2006.
- [17] Pavlas, M. *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů.* Brno, 2008. 109s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [18] Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Waste, Non-official Version, Brussels, COM, 2005
- [19] Sbírka zákonů č.110/2008, Příloha č. 3 k vyhlášce 439/2005 Sb., částka 34, str. 1377-1384.
- [20] Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 8/2008 ze dne 18. listopadu 2008, str.8
- [21] Vyhláška č. 150/2001 Sb. Ze dne 12. dubna 2001, Příloha č. 6. Dostupné z: <http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/zakony/150_2001.html>.
- [22] Martinec J. Emisní a výkonné měření na spalovně Termizo, a.s., Liberec, Část 3. Vyhodnocení energetických parametrů, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, leden 2006, str. 4.
- [23] Ch. Ludwig, S. Hellweg, S. Stucki. Municipal Solid Waste Management, Springer-Werlag, Germany, 2003.
- [24] Evropská komise, Generální ředitelství JRC, Společné výzkumné centrum, Integrovaná prevence o omezování znečištění, Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů, červenec 2005.

Přílohy

Příloha 1 Základní parametry parní kondenzační turbíny

Turbogenerátor	
Vstupní tlak	11 bar a
Vstupní teplota	270 °C
Výstupní tlak	1,3 - 2 bar a
Množství páry	18 tun/h
Napětí generátoru	400 V
Chladič¹⁰	
Množství páry	18 t/hod (na výstupním hrdle turb.)
Návrhový tlak páry	1,3 bar a (na výstupním hrdle turb.)
Stav páry	na mezi sytosti (na výstup. hrdle turb.)
Návrhová teplota chlad. vzduchu	26°C
Max. přípustný akustický výkon provozního souboru do vnějšího prostoru	85 dB(A)
Max. pracovní přetlak	2 bar g
Max. pracovní teplota	130°C
Nejvyšší letní teplota	34°C
Nejnižší zimní teplota	- 24°C
Nadmořská výška lokality	370 mnm
Nejvyšší přípustný tlak za turbínou	3 bar a
Tlak v napájecí nádrži (kam se vrací kondenzát)	Cca 1,8 bar a , výšková úroveň 18 m
Spalinový ventilátor pro zvýšení výkonu	
Množství spalin	45 m ³ /s
Celkový tlak	10846 Pa
Počet otáček	1512 ot/min
Měrná hmotnost	0,688
Teplota	240°C
Příkon	565 kW

¹⁰ Kondenzátor bude v provozu celoročně, v zimě ve speciálním režimu.